¿Cómo funciona una célula?

Fisiología celular

I 22

LA CIENCIA PARA TODOS

BIOLOGÍA

ANTONIO PEÑA

1934 - 2009

SHOUT
SHARE
IT

¿CÓMO FUNCIONA UNA CÉLULA?

Comité de selección

Dr. Antonio Alonso
Dr. Francisco Bolívar Zapata
Dr. Javier Bracho
Dr. Juan Luis Cifuentes
Dra. Rosalinda Contreras
Dra. Julieta Fierro
Dr. Jorge Flores Valdés
Dr. Juan Ramón de la Fuente
Dr. Leopoldo García-Colín Scherer
Dr. Adolfo Guzmán Arenas
Dr. Gonzalo Halffter
Dr. Jaime Martuscelli
Dra. Isaura Meza
Dr. José Luis Morán
Dr. Héctor Nava Jaimes
Dr. Manuel Peimbert
Dr. José Antonio de la Peña
Dr. Ruy Pérez Tamayo
Dr. Julio Rubio Oca
Dr. José Sarukhán
Dr. Guillermo Soberón
Dr. Elías Trabulse

La Ciencia para Todos

Desde el nacimiento de la colección de divulgación científica del Fondo de Cultura Económica en 1986, ésta ha mantenido un ritmo siempre ascendente que ha superado las aspiraciones de las personas e instituciones que la hicieron posible. Los científicos siempre han aportado material, con lo que han sumado a su trabajo la incursión en un campo nuevo: escribir de modo que los temas más complejos y casi inaccesibles puedan ser entendidos por los estudiantes y los lectores sin formación científica.

A los 10 años de este fructífero trabajo se dio un paso adelante, que consistió en abrir la colección a los creadores de la ciencia que se piensa y crea en todos los ámbitos de la lengua española —y ahora también la portuguesa—, razón por la cual tomó el nombre de La Ciencia para Todos.

Del Río Bravo al Cabo de Hornos y, a través de la mar océano, a la Península Ibérica, está en marcha un ejército integrado por un vasto número de investigadores, científicos y técnicos, que extienden sus actividades por todos los campos de la ciencia moderna, la cual se encuentra en plena revolución y continuamente va cambiando nuestra forma de pensar y observar cuanto nos rodea.

La internacionalización de La Ciencia para Todos no es sólo en extensión sino en profundidad. Es necesario pensar una ciencia en nuestros idiomas que, de acuerdo con nuestra tradición humanista, crezca sin olvidar al hombre, que es, en última instancia, su fin. Y, en consecuencia, su propósito principal es poner el pensamiento científico en manos de nuestros jóvenes, quienes, al llegar su turno, crearán una ciencia que, sin desdeñar a ninguna otra, lleve la impronta de nuestros pueblos.

Antonio Peña

¿CÓMO FUNCIONA UNA CÉLULA?

Fisiología celular

SEP
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

la
ciencia/122
para todos

Primera edición (La Ciencia desde México), 1995
Segunda edición (La Ciencia para Todos), 2000
Tercera edición, 2009
Primera edición electrónica, 2010

Peña, Antonio
¿Cómo funciona una célula? Fisiología celular /Antonio Peña. — 3a ed. — México : FCE, SEP, CONACyT, 2009
133 p. : ilus. ; 21 × 14 cm — (Colec. La Ciencia para Todos ; 122)
Texto para nivel medio superior
ISBN 978-607-16-0125-4

1. Célula 2. Biología 3. Divulgación científica I. Ser. II. t.

LC QH631 Dewey 508.2 C569 V.122

Distribución mundial

D. R. © 1995, Fondo de Cultura Económica
Carretera Picacho-Ajusco, 227; 14738 México, D. F.
www.fondodeculturaeconomica.com
Empresa certificada ISO 9001:2008

Comentarios: laciencia@fondodeculturaeconomica.com
Tel. (55) 5227-4672 Fax (55) 5227-4694

La Ciencia para Todos es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Secretaría de Educación Pública y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra, sea cual fuere el medio. Todos los contenidos que se incluyen tales como características tipográficas y de diagramación, textos, gráficos, logotipos, iconos, imágenes, etc. son propiedad exclusiva del Fondo de Cultura Económica y están protegidos por las leyes mexicana e internacionales del copyright o derecho de autor.

ISBN 978-607-16-0370-8 (electrónica)
978-607-16-0125-4 (impresa)

Hecho en México - *Made in Mexico*

ÍNDICE

Introducción 9

I. *Las moléculas y las células* 19
De qué estamos hechos 19
Los azúcares, almacenes de la energía solar 20
Las grasas 23
Las proteínas 27
Los ácidos nucleicos 29
Otros componentes de las células 33
Las asociaciones de las moléculas 33
Las membranas celulares 35
Los complejos supramacromoleculares 37
Los virus 40
Los organelos celulares 44

II. *El metabolismo: las transformaciones de las moléculas en las células* 45
El metabolismo proporciona materiales y energía 45
Cómo tomamos los materiales del exterior. 46
Anabolismo y catabolismo (construcción y destrucción de moléculas) 47
Metabolismo, energía y vida. 48
Las vías metabólicas y las enzimas. 50
Las coenzimas, las vitaminas y el metabolismo 51
Las principales transformaciones de los azúcares 53
La degradación de las grasas 57
Las transformaciones de las proteínas 59
El ciclo de los ácidos tricarboxílicos 63

Unas vías están conectadas con otras 64
La regulación del metabolismo; el control por el ADP (el trabajo) 66
Variaciones de las vías 68

III. *Los componentes celulares* 71
La pared celular y la protección de las células 71
La membrana celular 73
Los organelos celulares 78
El retículo endoplásmico 80
El aparato de Golgi 83
Las mitocondrias y la energía celular 85
Los cloroplastos 89
La vacuola 93
Los lisosomas 96
Los centriolos 97
Los microtúbulos y los microfilamentos 98
El núcleo 99
La división celular 102
La síntesis de las proteínas 105
La diferenciación celular 106
El nucléolo 107
El citosol 107

IV. *La especialización celular* 110
Los organismos procariontes 111
Los eucariontes 112
Los organismos unicelulares 112
Los organismos pluricelulares 117
Una célula muscular 118
Las células nerviosas 123
Las células sensoriales 127
Una célula adiposa, ¿una célula floja? 129
Las células del hígado y el metabolismo 130
Otras células 131

Bibliografía 133

INTRODUCCIÓN

Uno de los temas de mayor interés para los seres humanos es sin duda el funcionamiento de las células, si no por otra razón, porque de ellas estamos hechos. Como unidades básicas de estructura y función en los seres vivos, su conocimiento resulta esencial para entender cómo trabajan los tejidos, los órganos y los sistemas. La agregación de las células confiere a éstas propiedades adicionales, pero ello no modifica la mayoría de sus propiedades originales, pues sus funciones básicas siguen siendo las mismas; un organismo multicelular, no importa lo complejo que sea, basa su funcionamiento en el de cada una de sus células, simplemente agregando funciones a las ya existentes en cada una.

Los estudios sobre el comportamiento celular se originaron en múltiples esfuerzos de investigación paralelos, que poco a poco fueron convergiendo en un solo camino, tendiente a integrar todos los conocimientos obtenidos.

A partir de la invención del microscopio por Anton van Leeuwenhoek, se inició el estudio de las características de las funciones celulares más simples que podían ser observadas con este instrumento, como la división de las células. La llegada del microscopio abrió la posibilidad de observar objetos muy pequeños, y tuvo a la vez el mérito enorme de haber estimulado

la curiosidad de los estudiosos por conocer más sobre las propiedades y características de tejidos y células.

De manera independiente, a partir de los primeros decenios del siglo XIX, se inició el estudio de la composición química de los organismos vivos. Con cierta rapidez se llegó a definir un gran número de compuestos de todos tipos y complejidades que se podían aislar de los organismos vivos; se constituyó así una vasta área del conocimiento humano llamada *química orgánica*.

Uno de los organismos que desde tiempos anteriores a los que registra nuestro calendario atrajo la atención de los humanos, gracias a su fácil empleo en la fabricación del pan y del vino, fue la levadura. Pero sólo a comienzos del siglo XIX se iniciaron los estudios encaminados a conocer su funcionamiento, en un principio en el marco de numerosas consideraciones religiosas y filosóficas. Fue Theodor Schwann, científico alemán, quien propuso que la levadura, un organismo vivo, era la responsable de la fermentación. Schwann fue víctima de una violenta polémica iniciada en su contra por otro científico, Justus von Liebig, quien no sólo se opuso a sus ideas, sino que hizo cruel burla de ellas. Muchos años después, Louis Pasteur realizó los interesantes experimentos que confirmaron las ideas de Schwann, y que fueron en cierta forma los precursores de la actual biotecnología. Gracias a ellos se demostró que los problemas de la pobre calidad de la cerveza francesa frente a la alemana provenían de la presencia de bacterias en los inóculos de levadura que se utilizaban para la producción de la bebida, con lo que surgió la posibilidad de resolver el problema.

La levadura es capaz de realizar la siguiente transformación:

$$\text{Glucosa} \longrightarrow 2CO_2 + 2 \text{ moléculas de alcohol etílico}$$

Así, el interés por las levaduras se debe a que el CO_2 (bióxido de carbono) produce burbujas en la masa de harina que le

dan suavidad y aroma al pan ya horneado, y a que el alcohol es el principio activo de cientos y quizá miles de bebidas alcohólicas en el mundo, y una sustancia de gran interés industrial como solvente.

Hacia fines del siglo XIX, Eduard Buchner describió la capacidad de las células rotas de levadura, que podrían ser consideradas muertas, para fermentar el azúcar. Este descubrimiento abrió la puerta para que muchos otros científicos se dedicaran al estudio de tal transformación. Desde un principio se puso de manifiesto la enorme dificultad que implicaba aclarar la naturaleza del proceso y se necesitaron muchos años de trabajo y la labor de numerosos y brillantes investigadores para caracterizar el gran número de compuestos que intervenían en él. Quedó claro que había sustancias complejas, que se llamaron enzimas (del griego *zýmē,* que quiere decir levadura), que eran responsables de producir las transformaciones de unos compuestos intermediarios en otros, y con el tiempo se fueron encontrando muchas otras sustancias que participaban también en la fermentación. Posteriormente se descubrió que en el tejido muscular de los animales se daban transformaciones semejantes y luego se vio que el mismo proceso, como tal o con algunas variaciones, también lo realizaban miles de organismos y prácticamente todos los tejidos vivos conocidos. Hacia los primeros años del siglo XX, de esos descubrimientos había nacido la *bioquímica*.

A continuación se emprendieron también estudios sobre las transformaciones de otras sustancias, como las grasas y las proteínas. El trabajo de decenas de años de miles de investigadores en el mundo ha llevado al estado actual de conocimiento que tenemos sobre el metabolismo, esa enorme y complicada serie de transformaciones de las sustancias que ingerimos o que producimos en nuestro organismo.

Al mismo tiempo, y con microscopios cada vez mejores, se avanzó en la descripción de la estructura de los microorganis-

mos, los tejidos animales y vegetales y su componente unitario, la célula. Aunque en un principio fue una labor ardua, combinada a menudo con gran imaginación y especulación, el conocimiento del interior de la célula aportó hechos reales y teorías; con gran lentitud se fue formando una imagen de sus componentes, hasta llegar a asignar funciones particulares a cada uno. Uno de los grandes avances modernos fue el invento del microscopio electrónico, que aclaró conceptos, amplió los conocimientos y que, aun en la época actual, aporta cada día nueva información sobre la fina estructura de nuestras células.

Al final de los años cuarenta del siglo XX se inició por fin el camino hacia la integración del conocimiento sobre las formas o estructuras de las células. Por estas fechas se logró aislar los organelos celulares y comenzó el difícil trabajo de aclarar sus funciones. A partir de entonces dio inicio un trabajo mejor coordinado para conocer y relacionar esas funciones con las estructuras, lo que llevó a que, en la época actual, la adquisición de nuevos conocimientos gire alrededor de un esquema general que reúne lo que se sabe sobre la composición y el funcionamiento de las moléculas, las estructuras celulares, las células mismas, los tejidos, los órganos y los individuos.

Las características estructurales de los componentes celulares se pueden estudiar en las células íntegras. También, en ocasiones, es posible deducir conceptos fisiológicos a partir de imágenes de la actividad celular, como sucede en el curso de la división celular, de donde se ha obtenido muchísima información sobre los cromosomas, su duplicación y su papel en la transmisión de las características hereditarias de unas células a otras, así como sobre otras propiedades que las células presentan durante su división.

Por el contrario, en el caso de otros organelos, sería difícil obtener información a partir de la sola observación de la célula. Para conocerlos ha sido necesario obtenerlos en forma más o menos pura, a partir de homogeneizados celulares o remoli-

dos de las células hechos con ciertas precauciones. El caso del fraccionamiento de las células hepáticas (del hígado) puede ejemplificar el sencillo procedimiento que se sigue para obtener algunos de sus componentes. En la figura 1 se ilustra el sistema que se emplea para fraccionar, por centrifugación a distintas velocidades, los elementos de las células.

Para hacer un homogeneizado, primero se cortan con tijeras fragmentos pequeños de tejido y luego se les deposita en un medio isotónico, es decir, un medio que contenga una concentración de sustancias semejante a la de las células u organelos, para evitar que los cambios de la presión osmótica alteren la estructura y la función de los componentes. El homogeneizado así obtenido se vierte en un tubo de centrífuga, pasándolo a través de una gasa para eliminar los fragmentos no rotos de tejido y otro material fibroso que éste pudiera contener. Si se le somete a centrifugación a una velocidad suficiente para aumentar a 600 veces la fuerza de la gravedad (600 × g'), en unos 10 minutos se van al fondo del tubo las células no rotas y los núcleos. También es factible utilizar procedimientos adicionales para purificar los núcleos, lavándolos de diferentes maneras y volviendo a separarlos por centrifugación.

El sobrenadante de esta primera centrifugación se puede someter luego a una fuerza centrífuga 15 000 veces mayor que la gravedad. De esta manera se obtiene un paquete o pastilla de material en el fondo, que contiene en su mayor parte mitocondrias, lisosomas y otras partículas, como los centriolos. También hay procedimientos para purificar cada uno de estos componentes.

Si se toma el sobrenadante de esta segunda centrifugación y se le somete ahora a una fuerza centrífuga 105 000 veces mayor que la fuerza de la gravedad durante 60 minutos, se obtiene otro paquete o pastilla en el fondo, de la llamada fracción microsomal (de microsomas), compuesta principalmente por vesículas del retículo endoplásmico, muchas de las cuales tienen

adheridos los ribosomas. Posteriormente, utilizando sustancias que permiten liberar los ribosomas de las membranas, como por ejemplo un detergente, y centrifugando de nuevo a la misma velocidad, se obtienen los ribosomas puros.

Al sobrenadante que resulta de la centrifugación a 105 000 × g' se le llama *fracción soluble, o citosol,* y representa solamente una dilución del material no particulado de la célula en el medio de homogeneización.

Las fracciones así obtenidas se pueden utilizar para muchos estudios que nos dan información sobre las funciones de cada organelo. Los métodos para romper y homogeneizar las células varían de unos tejidos o tipos celulares a otros, y el procedimiento ilustrado para el caso de las células hepáticas no es más que un ejemplo de uno de los métodos más sencillos que hay.

Si queremos acercarnos al conocimiento de las funciones celulares no debemos olvidar el papel que desempeñaron los microorganismos en estas investigaciones; aunque sólo mencionamos la levadura, participaron muchos otros microbios, entre los que destaca el colibacilo o *Escherichia coli,* humilde bacteria que crece en el intestino de casi todos los humanos. De hecho, aquellos estudios que se iniciaron por simple curiosidad permitieron saber que hay grandes variaciones en el comportamiento metabólico de los microbios y los hongos microscópicos. A partir de los estudios básicos de los científicos se llegó también al descubrimiento de productos que inhibían el crecimiento de los microbios, como las sulfas o los antibióticos, y se encontraron caminos para aprovechar características particulares del metabolismo de algunos organismos para obtener sustancias de gran utilidad para el ser humano. Todo este trabajo de investigación dio pie al surgimiento de la *biotecnología,* gracias a cuya aplicación se obtienen diversos productos de los seres vivos.

Otro capítulo importante, iniciado en la década de 1950, consistió en la posibilidad de cultivar células de organismos

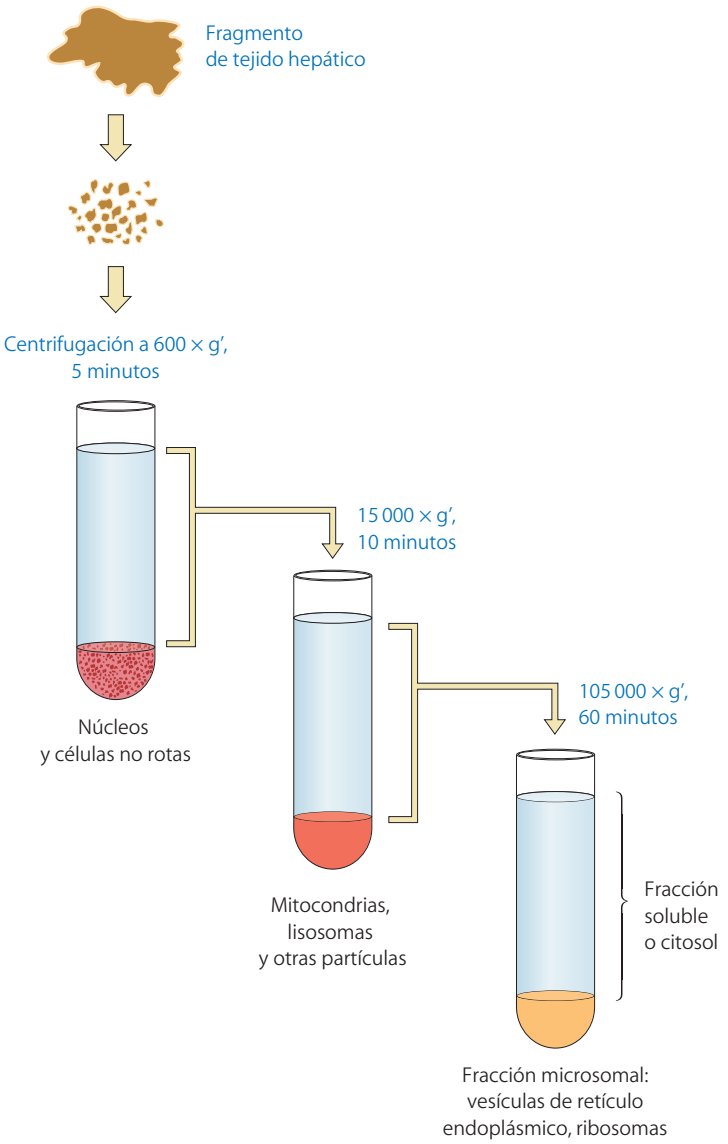


FIGURA 1. *Sistema general de obtención de los organelos celulares. A partir de un homogeneizado de células rotas, por centrifugación a diferentes velocidades y tiempos, se van obteniendo los distintos organelos.*

superiores, lo que también permitió ampliar el conocimiento sobre sus funciones. Por ejemplo, se pudo llegar no sólo a cultivarlas, sino a demostrar que una célula de un organismo es capaz de regenerarlo; cultivando células vegetales, en algunos casos se pueden reproducir, de manera mucho más rápida que por la siembra, variedades de plantas que conservan sus características originales. Son también muchos los ejemplos de tejidos que se pueden reproducir mediante el cultivo con el fin de regenerar o sustituir tejidos dañados en animales y humanos. Más recientemente, ha sido posible el milagro de la clonación con animales, no a partir de las células del organismo, sino de la manipulación de sus gametos; este procedimiento permite obtener un organismo igual al dueño de la célula cuya información se utiliza en la clonación. Los cultivos celulares, y aun los bacterianos, pueden ser invadidos por los virus, pero esto, que pudiera parecer desfavorable, ha servido para reproducir algunos de estos agentes patógenos y así elaborar algunas vacunas contra ellos.

Este libro busca acercar al lector al conocimiento de algunas de las funciones generales de las células para que dé un vistazo al mundo maravilloso de las estructuras y las funciones extraordinarias que tienen cabida en espacios tan pequeños. Casi todos creemos que una neurona y una célula muscular se comportan de manera muy distinta; sin embargo, al revisar sus funciones fundamentales resulta que son muchas más las semejanzas que las diferencias entre ellas y que es posible establecer un patrón o sistema general de comportamiento, no sólo de las células, sino en especial de sus componentes: la membrana, los organitos u organelos celulares, el núcleo, las mitocondrias, etc. Esto, además, es válido no sólo para las llamadas funciones, que típicamente se describen en el nivel fisiológico, como la reproducción, el movimiento u otras características; la base de las funciones celulares es en última instancia la gigantesca serie de transformaciones químicas, el gran número de interaccio-

nes de sus moléculas, que tienen lugar en un intrincado mundo en el cual ya no es posible diferenciar entre la bioquímica, la biología molecular y la fisiología de las células. Todo el conocimiento se va integrando dentro del área que recibe el nombre de *biología celular* o *fisiología celular.*

Como consecuencia, se busca presentar una imagen integral de las funciones celulares, sin diferenciar entre las que se pueden apreciar de manera más o menos macroscópica, como la división celular, y aquellas que no podemos ver, como las transformaciones de la energía o el transporte de sustancias hacia el interior o el exterior de la célula, y que en términos generales han sido consideradas más bien del dominio de la *bioquímica.* En el mundo actual, y cada vez más, tienden a desaparecer las divisiones artificiales, que en una época fueron más o menos claras, pero que más bien eran reflejo de la ignorancia de los investigadores y nunca una realidad biológica. Es fundamental que el lector asimile la idea de que no tiene sentido considerar por separado el movimiento de una célula que podemos ver en el microscopio, o hasta a simple vista, y los procesos moleculares que dan lugar a él. Las células se mueven porque algunas de sus moléculas se acortan o alargan como resultado de interacciones y deslizamientos de sus componentes y por la participación de otras moléculas, unas pequeñas y otras grandes, la mayor parte de ellas invisibles a nuestros ojos, pero todas implicadas en procesos que finalmente hacen posible el fenómeno macroscópico que podemos observar, como la contracción de una fibra muscular.

Es importante también que el lector esté dispuesto a revisar otros libros que en esta misma colección tocan conocimientos o temas que aquí se verán de manera muy resumida. Al final se recomendarán algunos títulos que deberán servir de consulta a quien esté interesado en ampliar ciertos conocimientos; algunos de esos libros serán de esta misma colección, La Ciencia para Todos, donde los estudiantes encontrarán textos sencillos

y amenos que podrán aumentar su interés por los temas que aquí presentamos. También haremos referencia a obras más complejas, que llevarán al interesado por un camino que finalmente lo podrá guiar hasta las fuentes primeras, los trabajos originales de los investigadores.

I. Las moléculas y las células

De qué estamos hechos

Las células, tejidos y organismos tienen como base estructural miles de moléculas cuyo comportamiento no obedece otras leyes que las generales de la física y de la química. Para penetrar en el conocimiento del funcionamiento de las células hay que comenzar por saber de qué tipos de moléculas están hechas en última instancia. Llegará el día en que se conozca la estructura detallada y el funcionamiento de esas moléculas.

Aunque los organismos vivos están compuestos de una variedad limitada de átomos, la diversidad de sus moléculas es enorme; ello se debe, en parte, a que en su composición el elemento central es el carbono. Este elemento puede formar cadenas y, en la mayor parte de los casos, se combina con el hidrógeno y el oxígeno, pero en muchísimos otros, con distintos elementos.

Aunque es enorme la diversidad de sustancias de que se componen los seres vivos, es posible agruparlas en ciertas categorías por sus semejanzas estructurales y sus propiedades. Hay compuestos cuyas unidades son cadenas cortas de átomos de carbono a los cuales se unen hidrógenos y grupos —OH (oxhidrilos); se les llama *azúcares* (nombre proveniente del árabe *assukar*) porque sus unidades son dulces. Hay otros compuestos, también de gran variedad pero con semejanzas estructurales, que están formados en su mayoría por cadenas largas, de 16 a

18 átomos de carbono e hidrógeno, y que se conocen como *lípidos.* Otra clase más de sustancias contiene, además de carbono, oxígeno e hidrógeno, otro elemento fundamental, el nitrógeno, en la forma del grupo —NH_2 (grupo amínico), y comprende unidades pequeñas, en número de 20 distintas, que se unen para formar largas y complicadas cadenas, las *proteínas.*

Los azúcares, almacenes de la energía solar

Los azúcares son sustancias compuestas de carbono, hidrógeno y oxígeno; reciben también el nombre de hidratos de carbono o carbohidratos debido a que, en muchos de ellos, por cada átomo de carbono hay dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, en la misma proporción que en el agua. De la oxidación de estos compuestos (con el oxígeno del aire) se obtiene energía según la reacción

$$C_6H_{12}O_6 + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O + \text{energía}$$

Durante la fotosíntesis ocurre el proceso inverso (que detallaremos más adelante): con la energía del Sol las células vegetales y las bacterias fotosintéticas son capaces de sintetizar azúcares a partir de CO_2 y H_2O. Los animales, incluyendo al hombre, seguimos el camino opuesto, tomando la energía de los azúcares, que originalmente provino del Sol, para la realización de nuestras funciones vitales. Así, los azúcares son en realidad una forma de almacenamiento de energía solar que los animales podemos aprovechar para vivir.

En la fotosíntesis se produce *glucosa;* este azúcar de seis átomos de carbono se puede transformar en muchos otros semejantes, ya sean también de seis, de menos, o más átomos de carbono. Entre los azúcares más comunes y conocidos se en-

cuentran, desde luego, la *glucosa,* que es la unidad con la que se forman muchas de las moléculas que comemos —como el almidón, presente en el trigo, maíz, papas, arroz, frijol, etc.—; la *fructosa,* o azúcar de la fruta; la *galactosa,* de la leche, ambas de seis átomos de carbono, y la *ribosa* y la *desoxirribosa,* de cinco átomos de carbono cada una. Estos azúcares se comportan como unidades que se repiten en la estructura de otros, y por ello se les llama monosacáridos. El término monosacárido se deriva del griego *mónos,* que quiere decir único o unidad, y *sákjaron,* que significa azúcar.

Estos azúcares simples, y relativamente pequeños, se pueden unir para formar, por ejemplo, la *sacarosa* o azúcar común, que proviene de la unión de una molécula de fructosa y una de glucosa. El azúcar de la leche, la *lactosa,* está formado por la unión de una molécula de glucosa y una de galactosa. Otro compuesto, formado por dos unidades de glucosa, es la *maltosa.* A estos azúcares formados por dos monosacáridos se les llama disacáridos (figura 1.1).

Se pueden producir uniones de más de dos monosacáridos hasta llegar a formar compuestos de cientos o miles de ellos, llamados polisacáridos (del griego *poly-,* muchos), como por ejemplo los que están constituidos por glucosa, de los cuales el *almidón* y el *glucógeno* representan la forma más común de almacenar azúcar; el primero, en las semillas y algunas raíces de las plantas, y el segundo, en los tejidos animales. Hay otra sustancia semejante, formada por cadenas larguísimas de glucosa que se constituyen en fibras, la *celulosa,* que es el componente casi exclusivo de la madera, el algodón y la fibra vegetal en general (figura 1.2).

Los azúcares simples o monosacáridos se pueden convertir en otros compuestos, también pequeños, a los que se les denomina derivados, entre los que se encuentran ácidos, alcoholes, etc. Estos derivados, a su vez, se pueden convertir en polímeros, es decir, en complejos de cientos o miles de unidades, que ade-

más desempeñan funciones muy variadas. Son, por ejemplo, los que dan lubricación a las mucosas y a las articulaciones de los animales. Son también compuestos de esta clase los que otorgan a las células parte de su identidad, como lo ilustra el conocido caso de los grupos sanguíneos, donde las diferencias entre los

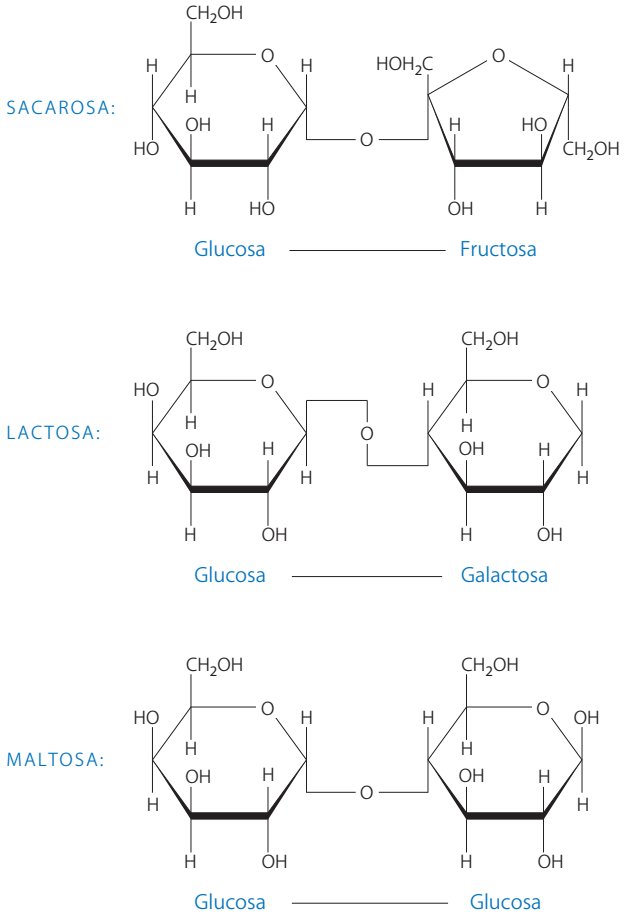


Figura I.1. *Los azúcares simples y los disacáridos. Los monosacáridos se pueden unir para formar disacáridos, como el azúcar común (sacarosa), o el azúcar de la leche (lactosa).*

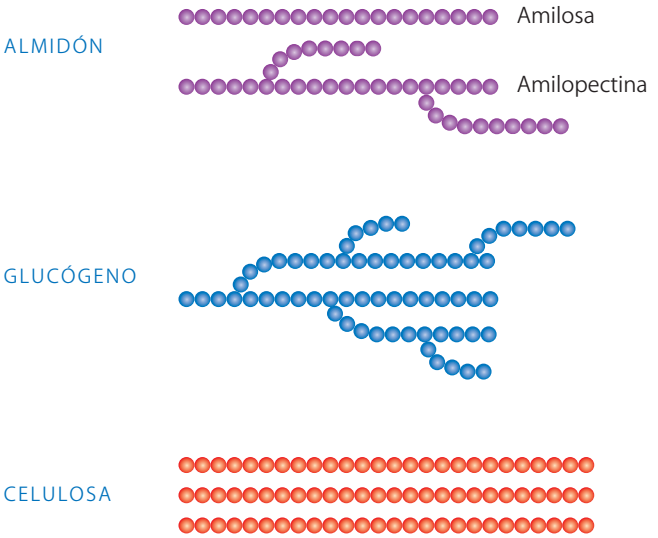


Figura 1.2. *El almidón, el glucógeno y la celulosa. Miles de unidades de glucosa se unen para formar estos compuestos.*

glóbulos rojos de distintos individuos dentro de una misma especie están determinadas por las diferencias entre los polímeros presentes en la superficie de la membrana de estas células.

Las grasas

Tal vez la principal característica de las grasas o lípidos sea que, aunque también están compuestas por carbono, hidrógeno y oxígeno, la proporción de este último es mucho menor, y el carbono y el hidrógeno se unen formando largas cadenas de manera semejante a como sucede en los hidrocarburos del petróleo. La base de muchas grasas son los llamados ácidos grasos, de los cuales los más comunes están formados por una cadena de unos 16 a 18 átomos de carbono que se representa de la siguiente manera:

$$CH_3—CH_2—CH_2—(CH_2)_n—CH_2—COOH$$

Estas moléculas de ácidos grasos se pueden unir a otras, de las cuales la más simple es el glicerol. En este caso, el compuesto resultante, que se representa en la figura 1.3, es una grasa neutra, como la manteca o el aceite comestible.

Estas moléculas son el componente principal del tejido adiposo (graso), que constituye una de las principales reservas de energía en los animales y en los seres vivos en general.

Entre los más importantes del grupo de los lípidos están los fosfolípidos, moléculas que intervienen en la composición de las membranas celulares. En los fosfolípidos, cuya estructura se parece a la de las grasas neutras, participan también el ácido fosfórico (en lugar de uno de los ácidos grasos) y otras sustancias y compuestos, como se muestra en la figura 1.4.

Los fosfolípidos tienen la propiedad de que su parte compuesta por la cadena hidrocarbonada, semejante al aceite, que forma una especie de "cola", es rechazada por el agua. La otra porción forma una especie de "cabeza", que puede interactuar libremente con el agua. Así formadas estas moléculas, cuando se dispersan en el agua, y más aún cuando se producen en las células, se organizan de manera que la porción hidrocarbonada, también llamada *apolar,* es rechazada por el agua y se retrae para unirse con las mismas porciones de otros fosfolípidos, y la parte *polar* queda expuesta al agua, formándose así una doble capa, impermeable en su porción central a las moléculas voluminosas o recubiertas de agua. De esta manera se constituye la estructura fundamental alrededor de la cual se agregan otras sustancias en las membranas celulares (figura 1.5).

Hay otros lípidos diferentes, entre los cuales se encuentra, por ejemplo, el colesterol, que forma parte de muchas membranas, así como otras moléculas semejantes, más por su estructura que por sus funciones o sus propiedades, como algunas hormonas y vitaminas, los ácidos biliares y otras (figura 1.6).

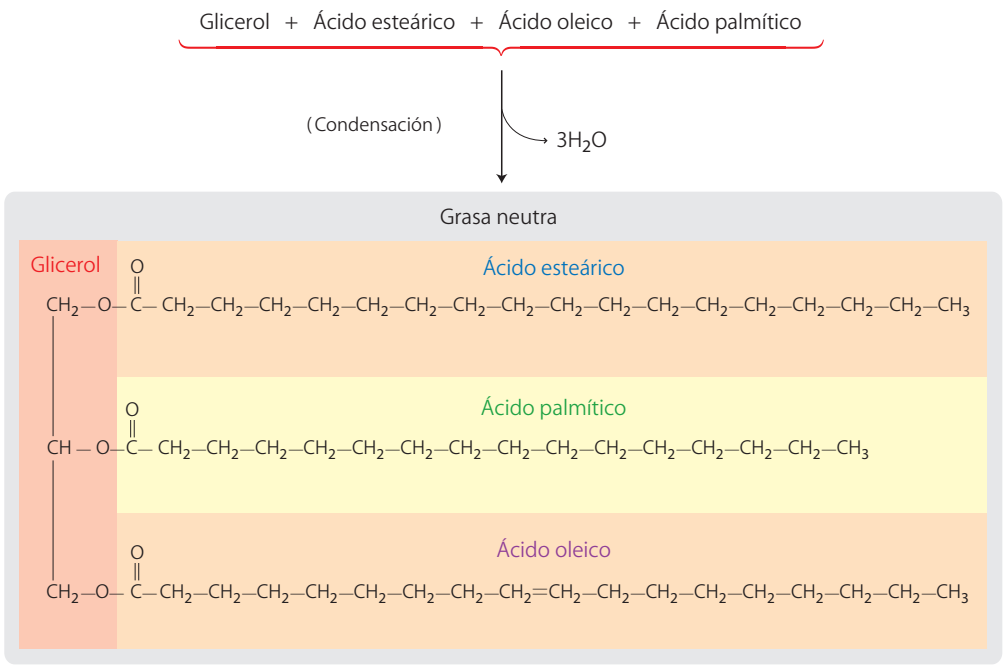


FIGURA I.3. *Una grasa neutra. Está formada por glicerol (también conocido como glicerina) unido a tres ácidos grasos con la pérdida de una molécula de agua entre cada uno de los tres enlaces. La diferencia entre los aceites y las mantecas está dada por los tipos de ácidos grasos que intervienen en su composición. Las mantecas son sólidas y los aceites son líquidos.*

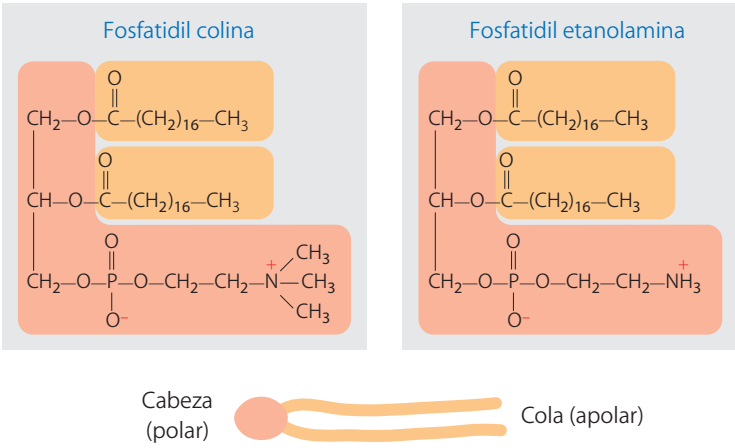


FIGURA I.4. *Un fosfolípido es parecido a una grasa neutra, pero en su composición intervienen, además de los ácidos grasos, el ácido fosfórico (H_3PO_4) y otras sustancias, como el inositol, la colina u otras. Tienen una parte llamada polar, capaz de interactuar con el agua, y una "cola", rechazada por ésta, que los obliga a formar una doble capa, base de la estructura de las membranas celulares.*

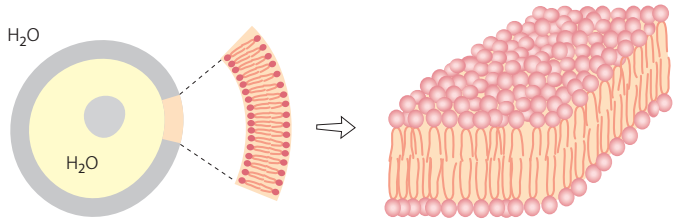


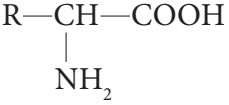
FIGURA I.5. *La organización de los fosfolípidos en las membranas. Las "cabezas" o porciones polares de los fosfolípidos quedan en contacto con el agua, y las porciones apolares, rechazadas por ella, forman una doble capa, impermeable a un gran número de sustancias.*

Las mantecas y los aceites comestibles también son fuentes muy importantes de energía para los animales y los vegetales. En mayor o menor grado, todos tenemos grasa en distintas partes del cuerpo; sin embargo, algunas personas, o incluso animales, llegan a acumular cantidades tan importantes que sus

depósitos grasos ya no podrían considerarse como simples almacenes de energía, sino como depósitos anormales. Es tal la importancia médica de esta condición que se le ha llegado a considerar como una enfermedad. Por otra parte, la grasa de algunas partes de nuestro cuerpo puede protegernos de golpes, pues actúa como un colchón. La grasa también es un aislante que nos permite resistir el frío; y es también la grasa acumulada bajo la piel la que da al cuerpo femenino su contorno suave y gran parte de su belleza.

Las proteínas

Hay alrededor de 20 sustancias diferentes que tienen la estructura siguiente:



Por tener el grupo —COOH, o carboxilo, son ácidos orgánicos, y por tener el grupo amínico ($—NH_2$) son aminas, por lo que se les llama *aminoácidos.* El grupo indicado por R puede representar desde un átomo de hidrógeno hasta estructuras más complicadas, para dar 20 distintos aminoácidos, que luego se unen entre sí para conformar cadenas de diferente longitud y una enorme variedad, que reciben el nombre de *proteínas.* En la figura 1.7 se representa una de ellas, en la que se puede apreciar la intrincada estructura que confiere a las proteínas su extraordinaria versatilidad como piezas funcionales de la maquinaria celular. Son las proteínas las que, por ejemplo, en las membranas se encargan de identificar y permitir el paso de sustancias hacia uno y otro lado; son las que, como enzimas, se encargan de facilitar miles de reacciones químicas de las que depende la vida de la célula, así como de muchas otras funciones.

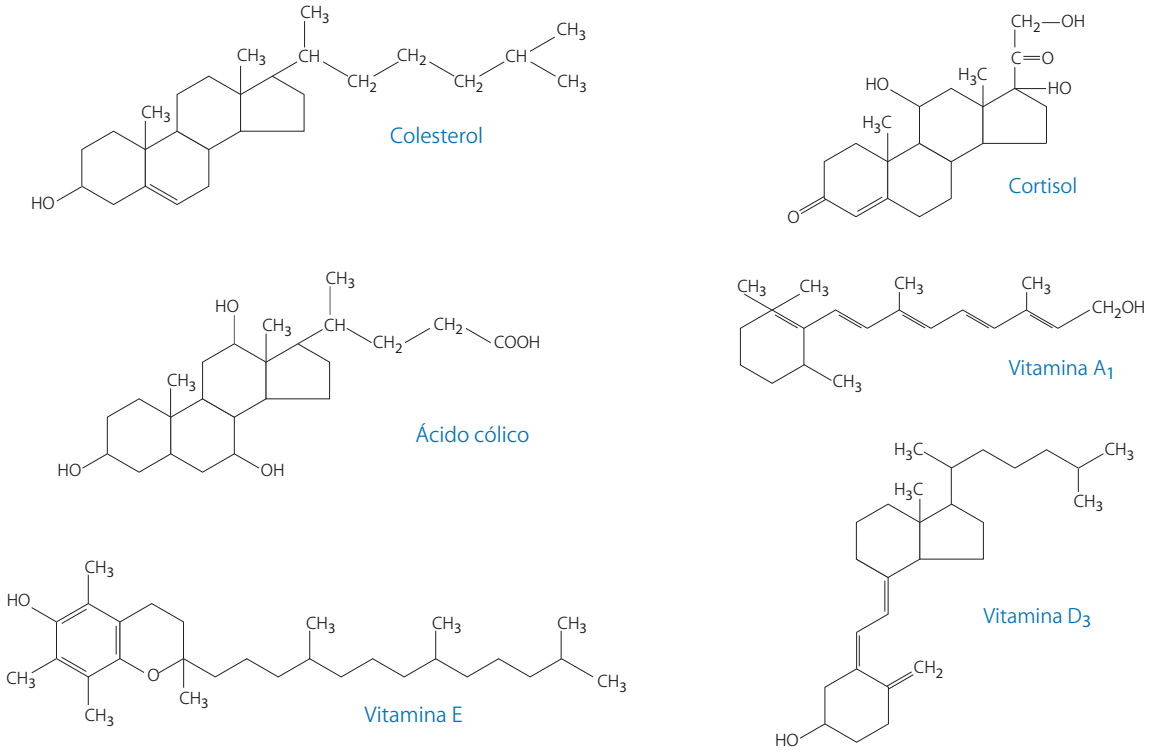


FIGURA 1.6. *El colesterol, la cortisona, el ácido cólico y las vitaminas A, E y D forman también parte del grupo de los lípidos.*

En las células encontramos también otros grupos de moléculas pequeñas, llamadas bases púricas y bases pirimídicas; las bases púricas son la adenina y la guanina, y las pirimídicas son la citosina, el uracilo y la timina (figura 1.8). Las bases se unen con otros compuestos para formar lo que se conoce con el nombre de nucleótidos, los cuales pueden ser *ribonucleótidos* o *desoxirribonucleótidos,* según que en su composición intervenga un azúcar ribosa o una desoxirribosa. Los nucleótidos, a su vez, se unen en largas cadenas para formar los ácidos nucleicos: el ADN o *ácido desoxirribonucleico,* a partir de los desoxirribonu-

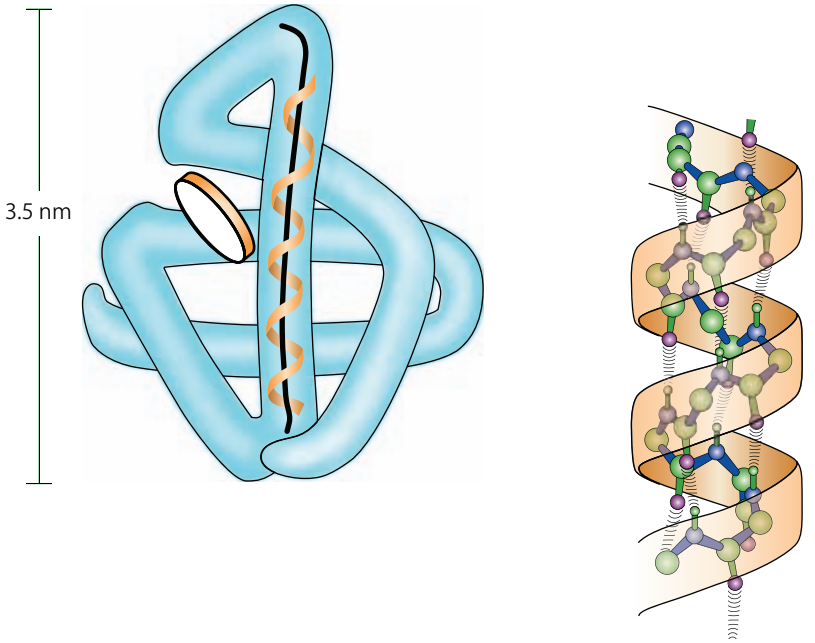


Figura 1.7. *La estructura de una proteína. Los aminoácidos se unen entre sí formando largas cadenas, que dan como resultado estructuras muy intrincadas que permiten a las proteínas desempeñar funciones de extraordinaria complejidad. Las proteínas son los elementos funcionales por excelencia de las células.*

cleótidos (figura 1.9), y el ARN o *ácido ribonucleico,* a partir de los ribonucleótidos.

Estas moléculas de ácidos nucleicos deben su importancia a que las células las pueden duplicar, es decir, sintetizar cadenas nuevas a partir de otras existentes, según reglas precisas, lo que les permite conservar y utilizar la información que las células y los organismos necesitan para mantener sus componentes, su estructura y su vida misma. El ADN, por esa misma propiedad de ser duplicado con precisión, es la molécula gracias a la cual los seres vivos pueden reproducirse y mantener casi invariables, por el mecanismo de la herencia, sus características individuales, según la especie de cada uno.

Las reglas para la duplicación del ADN y la transmisión de las características hereditarias de unos organismos o células a su descendencia son muy simples. El ADN está formado por una cadena doble de nucleótidos, como se muestra en la figura 1.10. Los nucleótidos se distinguen unos de otros por las llamadas "bases" que los componen, y que son *adenina, guanina, citosina* y *timina,* las cuales se ubican en la molécula de modo que *siempre* frente a una timina se encuentra una adenina, y frente a una guanina una citosina. Esta regla de complementariedad que se observa en la estructura del ADN constituye también la base para su duplicación; cuando ésta ocurre, la doble cadena se separa y, de acuerdo con la misma regla, se forman ahora dos cadenas dobles idénticas, que van a las células hijas durante la división celular.

La información contenida en el ADN no sólo se puede duplicar mediante estas sencillas reglas; también se puede transmitir o llevar al citoplasma para ser aprovechada, mediante la síntesis del ARN mensajero (ARNm), en un proceso llamado *transcripción,* que se realiza a partir de uno de los hilos del ADN, según una regla semejante a la de la duplicación: frente a una adenina, guanina, citosina o timina del ADN se coloca un nucleótido que contiene —también de forma invariable— ura-

cilo, citosina, guanina o adenina, respectivamente. El ARNm resultante es llevado al citoplasma donde, mediante procesos que estudiaremos luego, la información transcrita en él se traduce en la síntesis de una secuencia ordenada de aminoácidos específicos en forma de cadenas, que constituyen las proteínas.

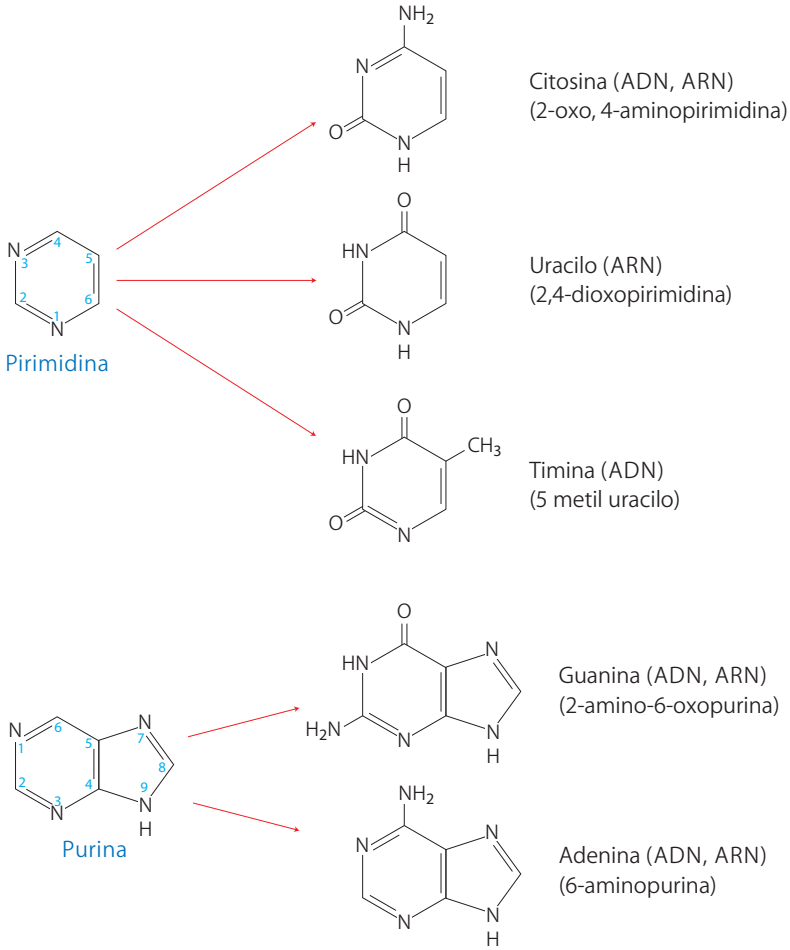


Figura 1.8. *Las bases púricas y las pirimídicas. Éstas son las unidades que forman los ácidos nucleicos siguiendo siempre un orden bien definido.*

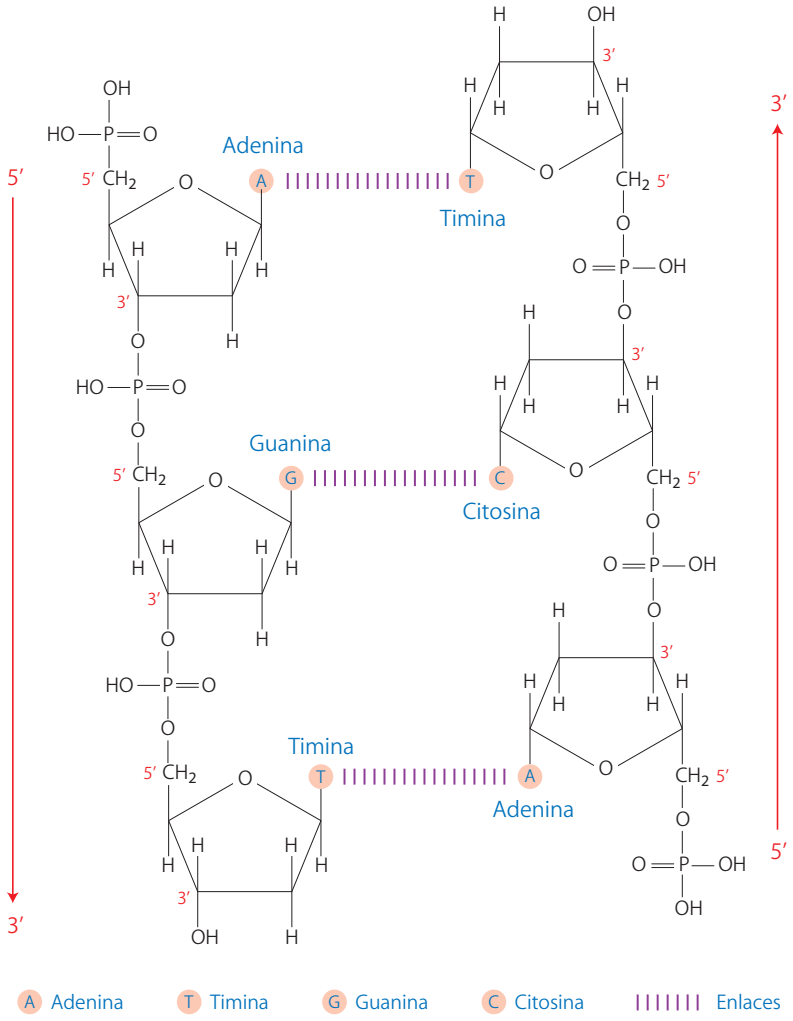


FIGURA 1.9. *Los ácidos nucleicos son cadenas enormes de nucleótidos, que contienen "escrita" en clave la información para la síntesis de las proteínas. Esta información, en el caso del ADN, se puede reproducir o duplicar cuando una célula se divide, para pasarla a las células hijas sin alteración.*

Éstas, como ya dijimos, conforman las verdaderas piezas de la maquinaria celular, en forma de enzimas, transportadores, moléculas contráctiles, receptores de señales, etcétera.

Otros componentes de las células

Finalmente, encontramos también en los seres vivos proporciones significativas de otros componentes, como el agua, en primer lugar, indispensable para su subsistencia, así como sales minerales que intervienen con relativa abundancia, como el sodio y el cloro (que ingerimos en forma de sal común), el potasio, el calcio o el fosfato (estos dos últimos fundamentales en la composición de los huesos y otras funciones), u otros elementos que participan en muy pequeñas cantidades, pero que son de gran importancia, como el cobalto o el yodo.

Las asociaciones de las moléculas

Vislumbrar la ya diversa naturaleza de las moléculas no es sino una etapa en la comprensión de la organización celular; las células, los tejidos, los órganos, los sistemas y los propios organismos resultan de la asociación organizada de las moléculas, que de maneras diferentes se reúnen y pueden formar estructuras más complicadas, empezando por asociaciones relativamente simples, como sucede en el caso de las membranas biológicas, cuya estructura básica está dada tan sólo por la asociación de los fosfolípidos. El siguiente nivel de organización es el de moléculas más grandes, como las proteínas o los ácidos nucleicos, que se pueden unir para formar los llamados complejos supramacromoleculares, dentro de los cuales tal vez los más conoci-

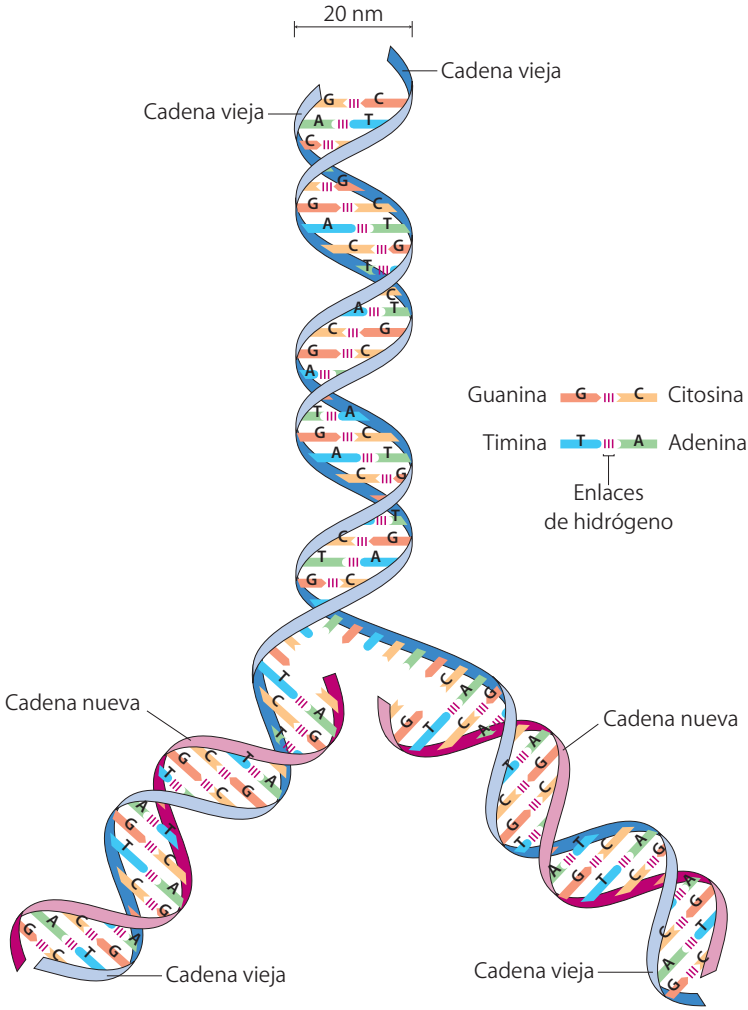


FIGURA I.10. *Regla para la duplicación del ADN. Siempre que el ADN se duplica, se fabrica una nueva molécula, también de doble cadena, en la que frente a una adenina se coloca una timina, frente a una guanina una citosina, y viceversa. Para enviar la información al citoplasma, se utilizan moléculas de ARN (ácido ribonucleico) que se fabrican mediante una regla semejante.*

dos para todos sean los virus. Otro nivel más de organización resulta de la asociación de cantidades enormes de moléculas, verdaderas obras de arte de la naturaleza con complicadísimos mecanismos de funcionamiento y estructura, que dan lugar a los llamados *organelos celulares*. Finalmente, los organelos, la membrana y el citoplasma se organizan para constituir una de las obras más maravillosas de la naturaleza: *la célula*.

Las membranas celulares

Los lípidos o, más concretamente, los fosfolípidos (véanse las figuras I.4 y I.5) son moléculas de las llamadas anfifílicas, es decir, que están formadas de dos porciones diferentes en cuanto a sus posibilidades de interacción con el agua. Según las reglas ya descritas en este mismo capítulo (p. 21), dichas moléculas se asocian para formar una doble capa, estructura básica de las membranas biológicas. Estas estructuras, hidrofóbicas en la parte central, no permiten por lo mismo el paso de moléculas polares, como los iones, ni de moléculas de mayor tamaño, y son además impermeables, salvo a partículas muy pequeñas, como las del agua.

Así, las células y también otras estructuras, como los cloroplastos, las mitocondrias, el núcleo, etc., están envueltas por una membrana que en principio es impermeable a la mayoría de las sustancias que se encuentran en la naturaleza, sobre todo a aquellas solubles en agua, las polares. Experimentalmente se pueden preparar vesículas artificiales microscópicas de fosfolípidos y demostrar que son impermeables a todas las moléculas con carga eléctrica.

El esquema de la estructura básica de las membranas que se presenta en la figura I.5 es un modelo muy simplificado de la realidad, ya que todas, en mayor o en menor grado, contienen una gran variedad de moléculas que les otorgan distintas pro-

piedades, de acuerdo con su origen particular. En la figura I.11 se presenta un modelo más cercano a la realidad, en el que se muestra que las membranas tienen insertadas, como parte de su estructura, moléculas de proteínas que se encargan de transportar materiales en un sentido o en otro. Los componentes de la cadena mitocondrial y de los sistemas de transformación de energía, así como los receptores de señales, son algunos de los tipos de proteínas que dan a las membranas celulares sus características funcionales.

De aquí resulta que las membranas celulares no son sólo estructuras impermeables, que sirvan para aislar a las células o a sus organelos del medio que los rodea, sino que también son *asociaciones* de muchas más moléculas. Se trata de estructuras dinámicas y de extraordinaria importancia que, más que separar dos espacios sirven para establecer comunicaciones convenientes entre ellos. La membrana celular debe contar, por ejemplo, con todos los elementos para seleccionar del medio las sustancias necesarias, y también para eliminar aquellas inútiles o que son perjudiciales para la célula. El movimiento de sustancias a través de una membrana celular puede llegar a ser tan importante como en los axones de las células nerviosas, en las cuales la capacidad de conducción de los impulsos nerviosos se debe a un sistema ordenado y propagado de movimientos de iones a lo largo de aquéllos. Por otra parte, dentro de la misma célula hay membranas que permiten delimitar a los organelos celulares, que son compartimentos y verdaderas unidades cuya especialización les confiere características estructurales y funcionales definidas, indispensables para el funcionamiento de la célula.

En muchos de estos organelos la membrana es el componente fundamental en el cual se realizan físicamente muchas de sus funciones, como se verá posteriormente para la mitocondria y el cloroplasto.

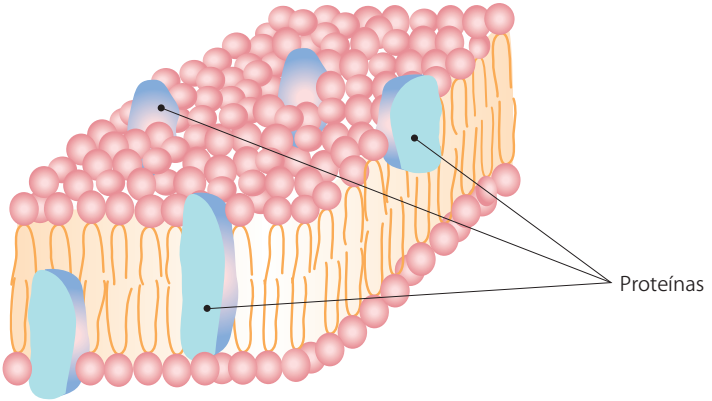


Figura I.11. *Estructura "real" de una membrana biológica. En el esquema se muestra que dentro de la bicapa se hallan incluidas muchas proteínas, que son las que le dan su capacidad funcional a la membrana.*

Los complejos supramacromoleculares

A la ya de por sí delicada estructura y función de una proteína se agrega todavía la posibilidad de que esté formada por más de una cadena de aminoácidos, lo que aumenta la complejidad y muchas veces la eficiencia funcional de la proteína al incorporar moléculas especializadas en la realización de una determinada tarea.

No es la presencia de más de una cadena de aminoácidos el límite en la estructuración de las proteínas. Se ha descrito también la formación de estructuras (o superestructuras) en las que participan varias proteínas, unidas con más o menos fuerza, que desempeñan funciones estrechamente relacionadas de manera tal que su asociación da lugar a verdaderas unidades multifuncionales. Éste es quizá el caso más simple de lo que se conoce como un complejo supramacromolecular, que recibe su nombre del hecho de que toda proteína es ya en sí una macro-

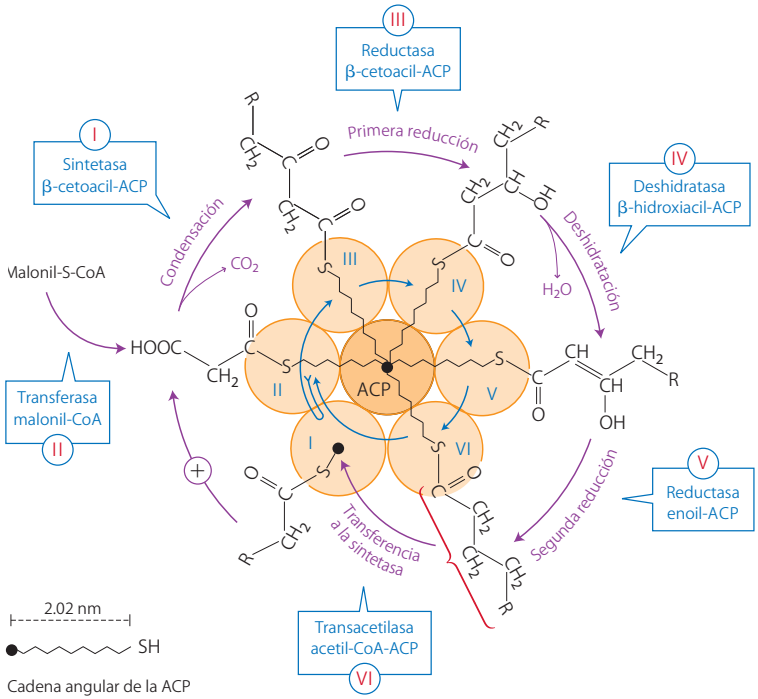


FIGURA I.12. *Un complejo multienzimático, llamado sintetasa de los ácidos grasos. La agregación de varias enzimas dentro de un complejo supramacromolecular otorga a éste la capacidad de realizar una función complicada en un espacio relativamente pequeño y sin posibilidad de dispersión de las moléculas participantes.*

molécula; en comparación con moléculas más pequeñas, como las de la glucosa o los ácidos grasos, cuyas masas varían de unos 200 a 300 daltones, una proteína de tamaño promedio posee una masa de alrededor de 50 000 o 60 000 daltones. A estos complejos, en los que cada molécula tiene la capacidad de realizar, digamos, una reacción química o enzimática, se les llama también complejos multienzimáticos. En la figura I.12 se muestra un ejemplo esquematizado de uno de ellos, el cual, con la parti-

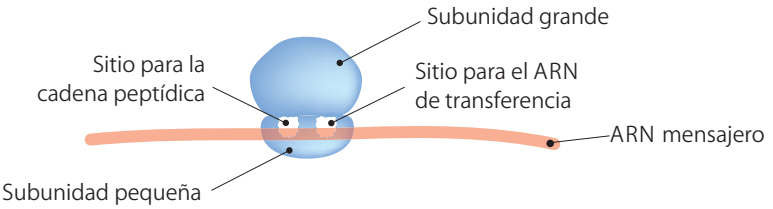


Figura I.13. *Un ribosoma; complejo sistema supramacromolecular donde se lleva a cabo la síntesis de las proteínas en las células.*

cipación de varias enzimas asociadas, se encarga de catalizar la síntesis o producción de los ácidos grasos, en un proceso que por cada "vuelta" agrega dos átomos de carbono a la molécula de la que parte.

Así como se pueden formar complejos de dos o más proteínas para realizar una función o una serie complicada de funciones, existe la posibilidad de formar complejos supramacromoleculares híbridos entre diferentes tipos de moléculas. Tal es el caso de los *ribosomas,* estructuras supramacromoleculares constituidas por proteínas y ARN (ácido ribonucleico), que reúnen todos los elementos que se requieren para realizar la síntesis de las proteínas. La estructura de los ribosomas varía de acuerdo con su origen y (principalmente) su tamaño, pero todos están formados por una subunidad grande y otra pequeña (figura I.13) que en conjunto se encargan de "leer" el mensaje que, a partir del ADN, es transmitido por el ARN mensajero (ARNm) al citoplasma de la célula, en el cual se encuentran los ribosomas. En la subunidad grande se encuentra un sitio en el cual se coloca otro tipo de ARN, llamado "de transferencia", que ya trae unido un aminoácido específico que se ha de agregar a la cadena de aminoácidos que se está sintetizando. Entre ambas subunidades hay un surco por el cual se desliza la molécula de ARNm a medida que se va leyendo, y por un lado de la subunidad grande sale la cadena de aminoácidos (cadena polipeptídica) que se va formando. Este asombroso conjunto, en el caso de

Escherichia coli, el colibacilo o bacteria común del intestino, está formado por una serie de moléculas que en total tienen un peso molecular de 2.7 millones de daltones. Además del ARN, la subunidad grande contiene 34 proteínas diferentes y la pequeña 21. Una de las características más notables de estas estructuras consiste en que, utilizando condiciones adecuadas, se les puede disociar en sus componentes y volverlas a integrar a partir de ellos.

Los virus

Hay un grupo de complejos de naturaleza semejante a los que acabamos de ver, pero formados por la asociación de proteínas y ácidos nucleicos, también según un orden preciso, y que tienen importantes repercusiones para los seres vivos; se trata de los *virus.* Estas estructuras tienen la capacidad de invadir a las células o a los organismos unicelulares y, una vez en su interior, reproducirse aprovechando los sistemas que para ello existen en la célula invadida. Fuera del ambiente celular, sin embargo, los virus sólo muestran limitadísimas capacidades, que no pueden compararse con las de una célula propiamente dicha.

Los virus tienen la capacidad de dirigir la maquinaria genética de las células que invaden para replicar sus propias proteínas y ácidos nucleicos, produciendo así nuevos virus. Al interactuar primero con la superficie de una célula, son capaces de introducirse, o de introducir sus ácidos nucleicos, y fuerzan al sistema normal de síntesis de proteínas y ácidos nucleicos de la célula a producir los componentes de ellos mismos, que luego dan lugar a nuevas partículas virales. En ciertas ocasiones, los virus son capaces de producir alteraciones tales, tanto en la estructura como en el funcionamiento de la célula, que llegan a causarle la muerte.

Cuadro I.1. *Características de algunos virus. Además del ácido nucleico, cada uno de ellos tiene distintas proteínas, según su tamaño*

	Peso molecular (megadaltones)	*Ácido nucleico*	*Dimensiones (nanómetros)*
Bacteriófagos			
T2	220	ADN	18
X174	6	ADN	6
Virus vegetales			
Mosaico del tabaco	40	ARN	300
Necrosis del tabaco	2	ARN	21
Virus animales			
Poliomielitis	6.7	ARN	30
Adenovirus	200	ADN	70
Vacuna	2 000	ADN	230

En el cuadro I.1 se presentan las características de algunos virus; todos están compuestos de proteínas y ácidos nucleicos, además de ser partículas de tamaño grande, con pesos moleculares de varios millones de daltones. Como puede verse, hay virus capaces de infectar a las bacterias, llamados bacteriófagos, cuyo estudio ha sido de gran utilidad en el campo de la biología molecular. Los virus de las plantas, y otros, como el del síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA), contienen ARN en lugar de ADN. Por otra parte, la cantidad y la diversidad de las proteínas virales es también grande; por ejemplo, el virus del mosaico del tabaco contiene sólo una especie de proteínas, en tanto que el bacteriófago T2 contiene 50 especies diferentes.

La forma y las dimensiones de los virus también son variables, pero todos tienen estructuras geométricas definidas. Los

Figura I.14. *Micrografía de un adenovirus. El contenido del virus está recubierto por una envoltura (E).*

virus son entidades biológicas de gran importancia, como puede inferirse ya de algunos de los que se presentan en el cuadro I.1: de ellos, el de la poliomielitis y el de la vacuna son ampliamente conocidos; el primero por la enfermedad que produce, y el segundo porque da lugar a la producción de anticuerpos o defensas que protegen en forma cruzada contra el virus de la viruela.

Por su parte, algunos adenovirus (véase la figura I.14) pueden producir tumores en los animales y en los humanos; como resultado de ello y de otros conocimientos, se sabe ahora que algunos tumores pueden ser producidos por virus. Cabe señalar también que otros virus, como los bacteriófagos, son capaces de atacar y matar a ciertas bacterias.

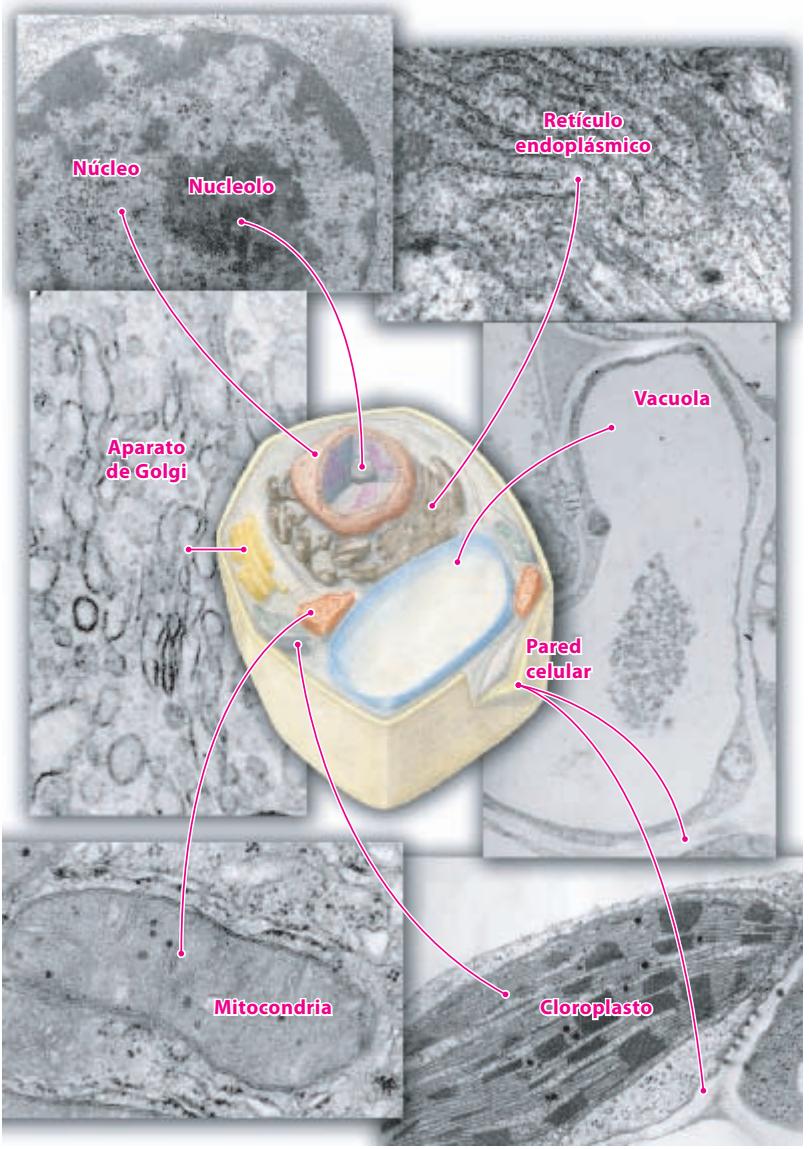


FIGURA I.15. *Esquema de la estructura de una célula vegetal y sus organelos. (Modelo tridimensional cortesía de Aline Berdichevsky).*

En la figura I.15 se presenta el esquema de una célula vegetal, que muestra las imágenes de los principales componentes identificables por microscopía electrónica. Desde el siglo XIX se iniciaron los estudios para aclarar la naturaleza del contenido de las células; se propuso que en su interior existía una sustancia de propiedades comunes para todas ellas, e incluso se iniciaron polémicas para definirla; se decía que el citoplasma tenía estructura alveolar o granular o fibrilar, y se aseguraba que sus propiedades eran especiales por tratarse de la sustancia vital por excelencia. Las observaciones con el microscopio electrónico que se presentan en la figura I.15 revelan cuán equivocadas estaban estas suposiciones. No en todas las células se pueden identificar las mismas estructuras, ni existen con la misma abundancia las que les son comunes.

En el capítulo III se describirá con detalle la estructura y la función de cada uno de estos organelos que se han identificado, y cuyo funcionamiento es verdaderamente asombroso y en gran parte aún desconocido para nosotros, pero que, gracias a las investigaciones de miles de científicos en el mundo, cada día comprendemos mejor. Las interacciones entre los organelos constituyen una verdadera y ordenada distribución y localización de funciones que finalmente hacen de la célula una estructura enormemente eficiente.

II. El metabolismo: las transformaciones de las moléculas en las células

El metabolismo no es otra cosa que la enorme serie de cambios que se producen en las moléculas, para convertirse unas en otras y en otras, de una manera intrincada y aparentemente interminable, la cual por ahora todavía estamos muy lejos de conocer en su totalidad. Cada organismo vivo está compuesto de una cantidad enorme de sustancias, muchas de las cuales es probable que aún se desconozcan, incluso en el caso de uno solo de los organismos unicelulares. Sin embargo, a pesar de la complejidad del proceso total sí es posible definir algunos de sus componentes, y aun para quienes no tienen un conocimiento profundo de bioquímica y de fisiología, formarse una idea aproximada de cómo es y para qué sirve a los organismos vivos.

El metabolismo proporciona materiales y energía

Las transformaciones de las moléculas tienen dos funciones principales: una es la construcción de tejidos, organelos, etc., materiales necesarios para que las células lleven a cabo sus distintas funciones, la más importante de las cuales es la renovación constante de sus propias moléculas; la otra es la de obtener las diferentes formas de energía que se requieren para mantener

las funciones vitales. Así, plantas y algas reciben como "alimento" materiales muy simples como sales minerales, CO_2 y H_2O, pero obtienen del Sol la energía para satisfacer sus necesidades de funcionamiento y fabricación de sus materiales. A su vez, las plantas nos proporcionan estos materiales y la energía contenida en sus enlaces, indispensable para nuestra sobrevivencia y la de los demás animales.

El metabolismo celular puede considerarse como una serie de caminos, con frecuencia de ida y vuelta, formados por una gran cantidad de moléculas que se transforman unas en otras. Algunas de estas moléculas llegan al organismo o a la célula del exterior, pero los procesos metabólicos pueden sintetizar también otras propias.

Cómo tomamos los materiales del exterior

Como mencionamos antes, las plantas y la mayoría de las algas toman materiales muy simples del exterior, y sólo requieren de sistemas para transportarlos al interior de las células.

Los animales, el ser humano incluido, recibimos del exterior tanto moléculas sencillas: agua, minerales, etc., como macromoléculas: almidones, proteínas o grasas. Estas últimas no se pueden aprovechar directamente y deben ser sometidas al proceso de digestión, para hidrolizarlas o partirlas en los componentes de que están formadas (véase el capítulo I), antes de ser absorbidas en el intestino y de esta manera entrar propiamente al organismo (figura II.1). Así, lo que ingresa a la sangre y de ahí es tomado por las células son moléculas simples: la glucosa y otros azúcares simples, los aminoácidos, los ácidos grasos y el glicerol (glicerina). Éstas son las moléculas que podemos considerar como punto de partida para revisar las transformaciones de las sustancias que reciben las células de un animal, por ejemplo, después de una comida.

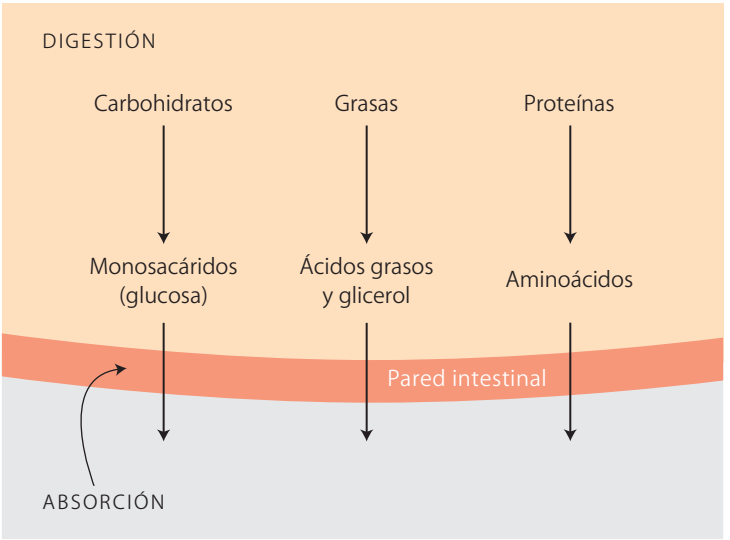


Figura II.1. *Digestión y absorción.*

La mayoría de los organismos unicelulares también cuenta con enzimas que degradan las moléculas más grandes de las sustancias que toman del exterior, y luego absorben o capturan los productos de ese proceso. Algunos organismos unicelulares como las amibas, o determinadas células animales especializadas como los leucocitos, pueden tomar del exterior moléculas grandes, o incluso partículas y hasta bacterias enteras, pero de todas formas también los digieren antes de utilizarlos.

Anabolismo y catabolismo (construcción y destrucción de moléculas)

Una vez que las células y los organismos reciben esas moléculas sencillas, uno de los caminos que éstas pueden seguir es la síntesis de las llamadas macromoléculas (del griego μακρο, *makrós*, grande), como el almidón en las plantas o el glucógeno en los anima-

les, que se forman de la unión de miles de moléculas de glucosa y representan formas de almacenamiento de azúcares. Es por medio de este proceso de síntesis que se forman también las grasas y otros tipos de lípidos, como los fosfolípidos —que constituyen las membranas celulares— o las grasas neutras (mantecas o aceites), que en los animales se acumulan en el tejido adiposo, y en el caso de las plantas éstas se depositan en algunas semillas. En ciertos animales, incluyendo al ser humano, las grasas pueden ser un importante almacén de reserva alimenticia. También por un camino de síntesis se forman las moléculas de las diferentes proteínas; pero ni éstas ni los aminoácidos se pueden almacenar. Sin embargo, hay una perenne renovación en las células y constantemente es necesario que tanto éstas como los organismos cuenten con aminoácidos para producir moléculas nuevas y degradar las existentes.

La figura II.2 muestra en un esquema la posibilidad de que las moléculas unitarias sean utilizadas para producir otras más grandes, y señala también que todas ellas se pueden degradar hasta producir CO_2, H_2O y, en el caso de los aminoácidos, amoniaco (NH_3). De esta manera distinguimos con claridad dos procesos: el *anabolismo,* donde a partir de moléculas más pequeñas se obtienen otras más grandes, y el *catabolismo* en el cual, a partir de las moléculas más grandes, se obtienen las más pequeñas.

Metabolismo, energía y vida

Una característica importante de los procesos metabólicos es que en el catabolismo de las moléculas pequeñas —como la glucosa, los ácidos grasos o los aminoácidos— es donde se logra una transformación esencial de la energía de sus enlaces químicos, sobre todo en la de los enlaces del adenosín trifosfato (ATP). Además de éste, hay otras sustancias que pueden ser utilizadas directamente para proporcionar la energía que requie-

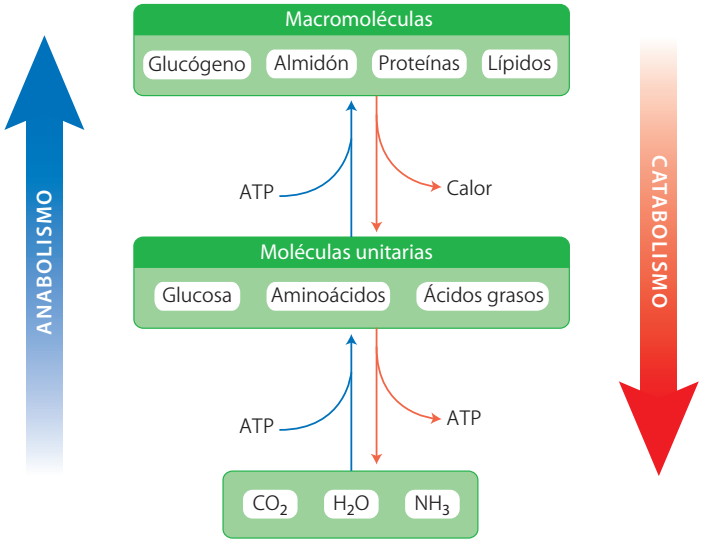


Figura II.2. *Esquema del metabolismo y sus componentes, el anabolismo y el catabolismo. Hay unidades para las grasas, los azúcares y las proteínas, que pueden formar macromoléculas, o pueden degradarse hasta CO_2, H_2O y NH_3 principalmente. Además, durante el catabolismo, la energía de los enlaces de las moléculas se transforma en parte en calor y en parte en otras formas, la de los enlaces del ATP (véase el capítulo III), o la de los aceptores de hidrógenos.*

ren las células a fin de llevar a cabo sus funciones. Por su parte, los procesos de síntesis, tanto de moléculas sencillas a partir de otras más pequeñas como los de las macromoléculas, requieren de la energía que proviene del ATP y del llamado poder reductor que tienen las moléculas llamadas NADH y NADPH, entre otras, cuya principal característica es que reciben electrones de dos átomos de hidrógeno, los cuales tienen una energía superior a la del hidrógeno puro, y por ello también son fuente de energía. Es importante señalar que la degradación de las macromoléculas para producir las unidades de que fueron formadas, da lugar a la transformación de la energía de sus enlaces en una sola forma: el calor.

Sin embargo también en la degradación de las moléculas para producir otras más sencillas, o para sintetizar ATP, hay una liberación de calor. Prácticamente todas las reacciones que tienen lugar en los seres vivos desprenden calor.

Las vías metabólicas y las enzimas

Otra característica del metabolismo es que prácticamente cada una de sus transformaciones está movida invariablemente por una enzima diferente. Las enzimas son proteínas —las moléculas más complicadas de las células— que se encargan de catalizar, es decir, de acelerar las reacciones individuales del metabolismo. Aunque las reacciones químicas de cada paso metabólico pueden ocurrir en forma espontánea, prácticamente todas ellas transcurrirían con una enorme lentitud si no existieran las enzimas; lo que hacen éstas es acelerar muchísimo (habitualmente mucho más de un millón de veces) las reacciones individuales del metabolismo. Casi cada reacción requiere de una enzima diferente para moverse con suficiente velocidad. Pero además, si bien las enzimas son capaces de acelerar las reacciones químicas de los seres vivos, muchas de ellas también son susceptibles de regulación por muy diversas sustancias. Esto hace que en muchas ocasiones ciertas enzimas regulables puedan modular la velocidad de funcionamiento de toda una vía metabólica.

La figura II.3 muestra un esquema del funcionamiento de una enzima, que es una proteína grande que promueve la transformación de una o más moléculas, las cuales reciben el nombre genérico de *sustrato* en otra u otras, llamadas *productos.* En ocasiones participan también *coenzimas,* moléculas con funciones definidas.

Es muy interesante que en algunas de las reacciones del metabolismo además de las enzimas —proteínas grandes— participan en poca cantidad otras moléculas mucho más pequeñas, llamadas coenzimas, en cuya composición en muchos casos intervienen las vitaminas. A continuación señalamos algunas de ellas.

Nicotinamida. Es la vitamina cuya deficiencia produce la enfermedad llamada pelagra. Es componente de dos coenzimas, el nicotín adenín dinucleótido (NAD) y el nicotín adenín dinucleótido fosfato (NADP). Son las portadoras de los hidrógenos y sus electrones en muchas reacciones de oxidación, y se utilizan para la síntesis de algunas moléculas o en las transformaciones de energía en los enlaces de ATP. Ambas tienen gran

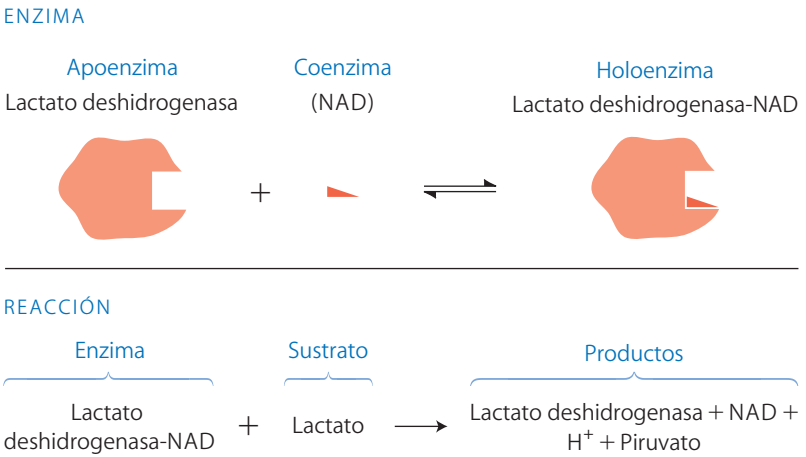


Figura II.3. *Los componentes de un sistema enzimático: la enzima, el o los sustratos y el o los productos.*

importancia en los procesos de transformación de energía. Su estructura y funciones se describen de manera más amplia en el capítulo III.

Riboflavina. Es otra vitamina componente de dos coenzimas implicadas también en el transporte de electrones en la cadena respiratoria: el flavín adenín mononucleótido y el flavín adenín dinucleótido. Estas coenzimas intervienen asimismo en la cadena de transporte de hidrógenos y electrones.

Ácido pantoténico. Es parte de la llamada coenzima A —que se muestra más adelante en este capítulo— y participa en el metabolismo de los ácidos grasos, en especial en el de los fragmentos de dos átomos de carbono, constituyendo la acetil coenzima A.

Tiamina. Esta vitamina también participa en algunas reacciones en las que ciertos ácidos pierden su carboxilo (grupo —COOH). Las enzimas encargadas de este proceso se llaman descarboxilasas.

Piridoxina. Interviene en las reacciones de transferencia de grupos amínicos de los aminoácidos, como coenzima de diversas transaminasas, así como en otras reacciones.

Éstos son sólo algunos ejemplos de la participación de las vitaminas en el metabolismo, como parte de las enzimas, en las llamadas coenzimas. En realidad estas sustancias son una especie de segundo sustrato, o componente del sistema enzimático, que interviene en la reacción. En las reacciones de deshidrogenación, por ejemplo, las coenzimas reciben electrones de un sustrato y luego los transfieren a otro donde participa otra enzima. De esta manera, en muchos de estos casos las coenzimas son otro sustrato que también se modifica durante la

reacción, pero tienen la característica de ser utilizadas en muchas reacciones diferentes. Al NAD, por ejemplo, lo encontraremos en la glucólisis, en el ciclo de Krebs y en distintos tipos de reacciones de deshidrogenación.

Las principales transformaciones de los azúcares

Como ya se describió antes, los organismos contienen diferentes tipos de carbohidratos: los monosacáridos, los disacáridos, los oligosacáridos, y los polisacáridos, dependiendo del grado de agregación o polimerización o de la cantidad de unidades de los diferentes monosacáridos que conforman dichas sustancias. No hay duda de que el eje del metabolismo celular es la glucosa; este monosacárido está distribuido de manera universal en todos los organismos, ya sea en forma libre —como parte de otras moléculas, como los disacáridos sacarosa y lactosa, o los polisacáridos de reserva, como el almidón, el glucógeno o la celulosa— o por medio de productos derivados, algunos de los cuales se mencionaron en el capítulo I.

Los almacenes de azúcar

Cuando la glucosa entra a una célula puede tomar el camino hacia la síntesis de diferentes polímeros. La figura II.4 muestra cómo este azúcar, a través de varios pasos, se puede incorporar en las células animales a una molécula ya existente de glucógeno. En las células vegetales uno de los destinos de la molécula de glucosa es convertirse, por un mecanismo semejante, en almidón. Tanto el glucógeno como el almidón y otros polímeros de los azúcares representan sistemas de reserva que tienen los organismos para diferentes fines. Por lo tanto, también hay vías para la degradación de estas sustancias; la figura II.4 muestra también que la conversión de la glucosa en glucógeno es un

camino reversible. De hecho, cuando comemos se sintetiza el glucógeno, con el fin de conservar los azúcares que hemos ingerido. Luego, este polímero se va degradando lentamente entre una comida y otra, para mantener el nivel de glucosa en la sangre, pues hay muchos tejidos que así lo requieren para tener disponible en forma constante un aporte del azúcar. En los animales, el glucógeno sirve como almacén de azúcar que se gasta entre una comida y otra; en las plantas, el almidón se guarda en las estructuras que aseguran su reproducción, como en las semillas de los cereales, o en los tubérculos, como las papas.

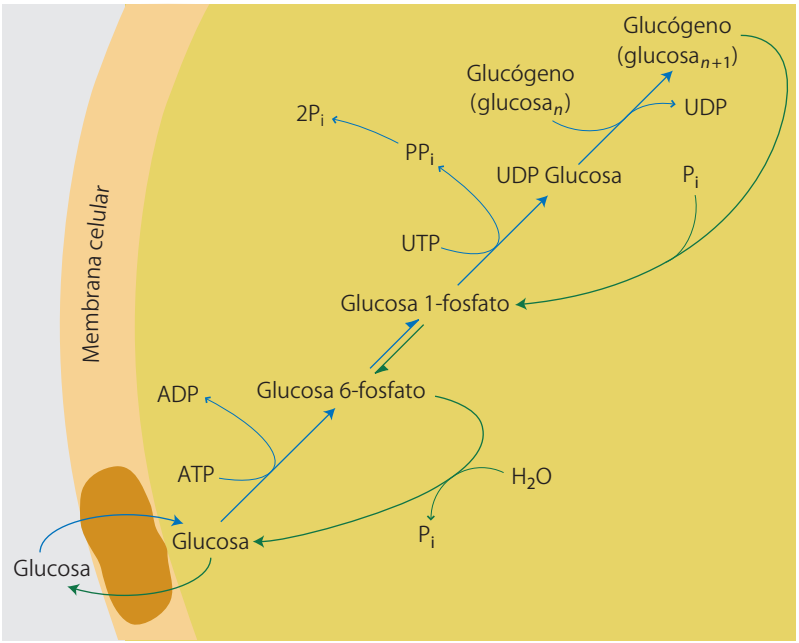


Figura II.4. *El almacenamiento de la glucosa. En los animales se polimeriza para formar glucógeno, que es su principal forma de almacenamiento, y en los vegetales, forma almidón. Ambas formas pueden luego degradarse para otra vez producir glucosa, que los seres vivos pueden aprovechar.*

El otro camino metabólico que puede seguir la glucosa es su degradación; para simplificar, podemos pensar en una célula animal, la muscular, por ejemplo. La figura II.5 muestra las transformaciones que este azúcar sufre para llegar a convertirse en piruvato (la sal del ácido pirúvico) o en lactato (la sal del ácido láctico).

El esquema completo se presenta únicamente con la intención de mostrar la complejidad del sistema, aunque no está desarrollado con todo el detalle. Sin embargo, de este esquema es útil destacar algunos beneficios importantes que la célula logra al degradar en este proceso una molécula de glucosa:

a) La degradación de la glucosa para convertirla en lactato o piruvato sólo implica, en cierta forma, partir la molécula de seis átomos de carbono, en dos de tres. No obstante lo aparentemente complicado de la vía metabólica, la transformación final es relativamente simple.

Glucosa Lactato

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2CH_3—\underset{\displaystyle OH}{\underset{|}{CH}}—COOH$$

b) En este proceso, aunque al principio se invierte energía en forma de dos moléculas de ATP, se logra una ganancia al final, ya que con el ingreso de dos moléculas de fosfato inorgánico (P_i) y cuatro más de ADP se obtiene un total de cuatro moléculas de ATP. El resultado neto es que al partir una molécula de glucosa en dos de lactato se generan en forma neta dos moléculas de ATP a partir de dos de fosfato y dos de ADP.

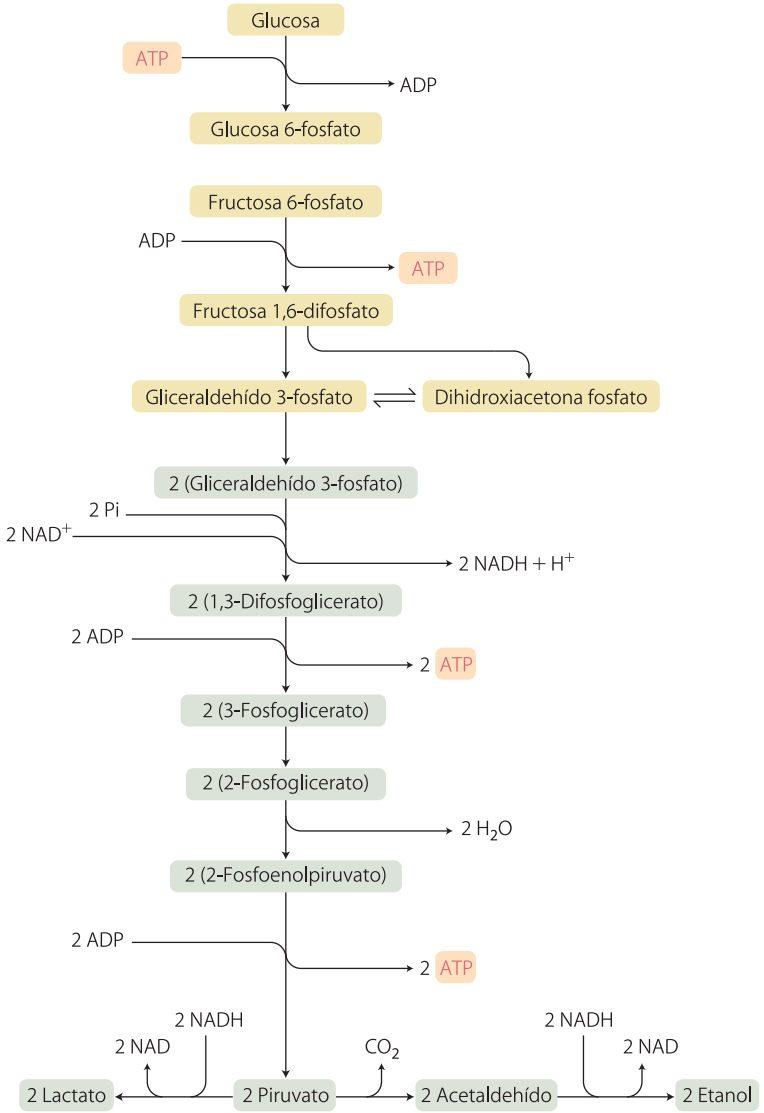


FIGURA 11.5. *Esquema general de la glucólisis.*

c) Aunque la cantidad de ATP que resulta de cada molécula de glucosa es muy pequeña, la glucólisis puede ser una vía de obtención de energía sumamente veloz, y durante el ejercicio muscular intenso, de un atleta de competencias de duración breve, por ejemplo, puede proporcionar casi toda la energía que se requiere, compensando el bajo rendimiento energético con una disponibilidad inmediata.

d) Otro hecho interesante es que la degradación de la glucosa por esta vía se puede continuar hacia el llamado ciclo de los ácidos tricarboxílicos, o ciclo de Krebs, para en él degradarse totalmente hasta dar CO_2 y agua. En este ciclo, por otra parte, al conectarse con la fosforilación oxidativa —que se estudiará al hablar de las mitocondrias— se puede producir la mayor parte del ATP que la célula requiere. Por esta razón, la glucólisis puede considerarse también como la vía de entrada de la glucosa y los azúcares en general a una de las vías catabólicas principales.

e) Por último, esta vía es en gran parte reversible; es decir, a partir del piruvato se puede obtener glucosa, e incluso el mismo glucógeno y otros polisacáridos. Esto es importante porque así podemos transformar los aminoácidos, que provienen de las proteínas, en azúcares.

La degradación de las grasas

Como ya se vio en el capítulo I, las grasas neutras están compuestas de glicerol, que también conocemos como glicerina, y ácidos grasos. Los primeros pasos para su degradación consisten en separar los ácidos grasos del glicerol. Luego, la parte más importante de la degradación de los lípidos es la transformación, paso a paso, de las cadenas largas, de 16 a 18 átomos de carbono las más comunes, en fragmentos de dos átomos de carbono, como acetil CoA.

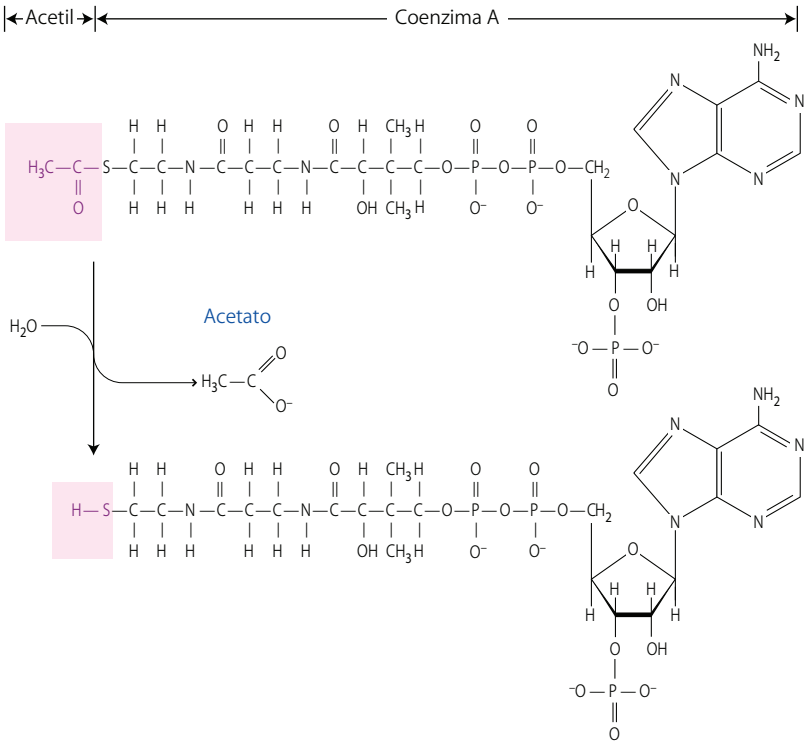


Figura II.6. *La coenzima A y la acetil CoA.*

La coenzima A (figura II.6) es una molécula compleja que sirve como una especie de mango o asa que las enzimas requieren para el manejo de fragmentos de dos átomos de carbono o mayores, formando lo que se llama acetil (de acetilo) coenzima A, o algún otro compuesto. Sin embargo, la única parte que sufre cambios es la porción del ácido graso o el acetilo unido a la coenzima A. En la figura II.7 se presenta parte del proceso cíclico conocido como beta oxidación, mediante el cual una molécula de un ácido graso, unida a la coenzima A, poco a poco termina por perder, como acetil CoA, un fragmento de dos átomos de carbono. Este proceso tiene las siguientes características:

a) Es un ciclo que se repite. Partiendo de un ácido graso de, digamos, 18 átomos de carbono, en la primera vuelta el ciclo produce uno de 16, en la siguiente vuelta produce uno de 14, y así sucesivamente, hasta que todo el ácido graso se convierte en fragmentos de acetil CoA de dos átomos de carbono.
b) El proceso completo se lleva a cabo en la mitocondria.
c) En cada vuelta de este ciclo la célula recoge en dos moléculas especiales —el FAD y el NAD, que se convierten en $FADH_2$ y NADH— dos pares de hidrógenos, los cuales representan una forma de energía útil para sintetizar ATP.
d) Dado que durante el proceso se degrada todo el ácido graso hasta fragmentos de acetil CoA, con éste se puede alimentar el ciclo de los ácidos tricarboxílicos, igual que con los derivados del piruvato y de la glucosa, y oxidar dichos fragmentos hasta CO_2 y agua para así obtener energía en cantidades muy grandes.
e) Como en el caso de la vía anterior, la degradación de las grasas es en cierta forma reversible. Aunque no intervienen las mismas enzimas ni los cofactores, y ni siquiera ocurren en el mismo sitio, el proceso de síntesis de un ácido graso es parecido, pero inverso a la degradación, y en cada vuelta de un ciclo a la molécula original se añade un fragmento de dos átomos de carbono. Esta nueva vía de síntesis también es útil para sintetizar grasas a partir de azúcares o de proteínas (figura I.12).

Las transformaciones de las proteínas

Dado que en el capítulo III se describen los mecanismos de síntesis de las proteínas, en esta sección sólo mencionaremos los mecanismos de conversión de unos aminoácidos en otros y de su degradación. Por supuesto, las proteínas se pueden degradar

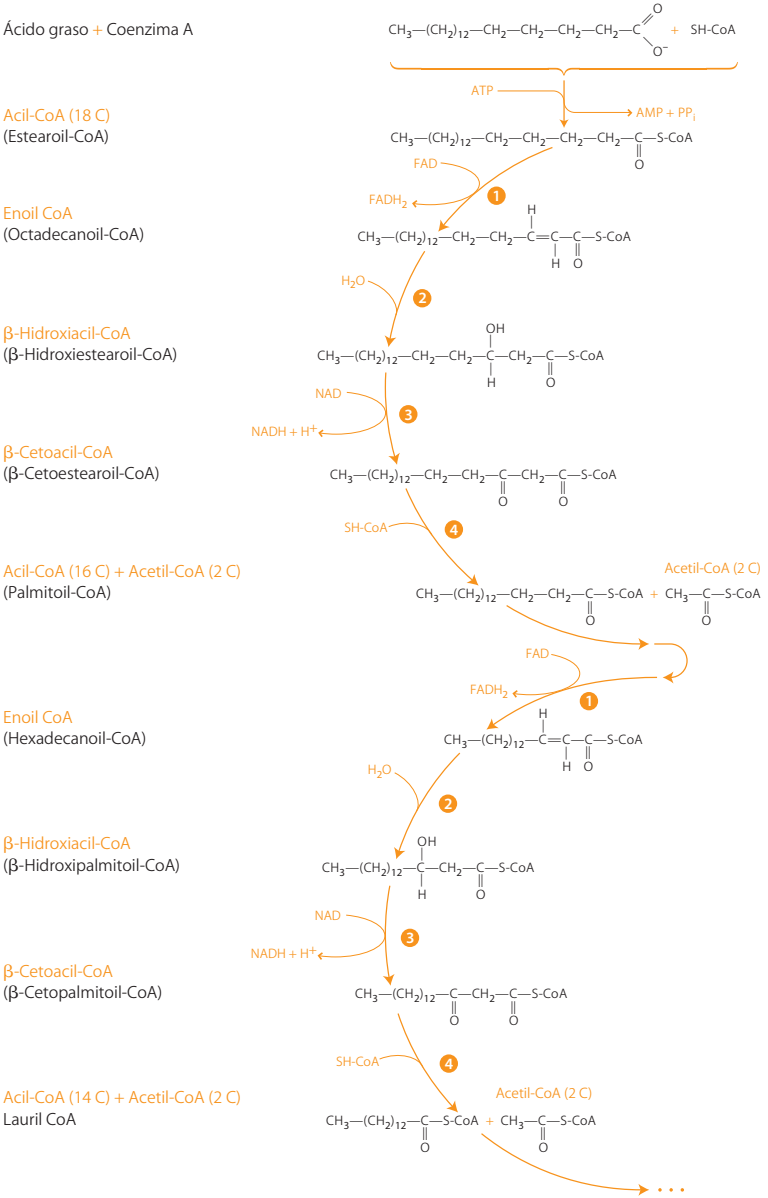
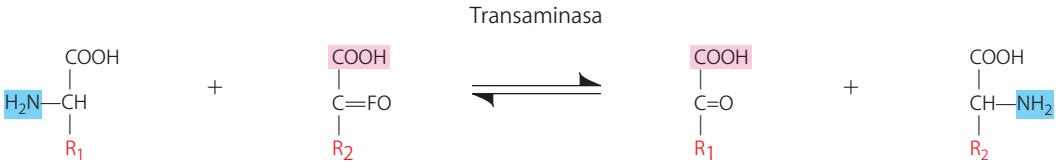
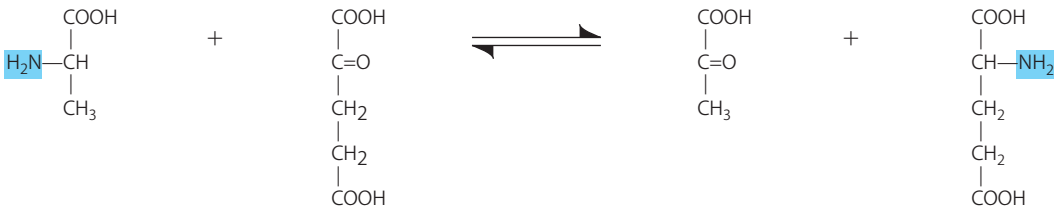


FIGURA II.7. *La beta oxidación de un ácido graso.*

MECANISMO GENERAL



TRANSMINASA GLUTÁMICO-PIRÚVICA



Alanina | Ácido a-cetoglutárico | Ácido pirúvico | Ácido glutámico

FIGURA 11.8. *La transaminación. Un cetoácido recibe el grupo amínico de un aminoácido, y éste a su vez se convierte en cetoácido.*

para dar aminoácidos, y viceversa. En cierta forma, las transformaciones más interesantes son las de los aminoácidos.

En las células hay cetoácidos y aminoácidos, cuya diferencia es tan sólo que los primeros tienen un grupo ceto (—C═O) en el carbono número 2, y los segundos un amino ($—NH_2$). Como se muestra en la figura II.8, un cetoácido (el piruvato que ya conocemos) se puede convertir en un aminoácido (alanina) al tomar el grupo amínico de otro aminoácido (glutámico), el cual a su vez se convierte en el proceso en cetoácido (cetoglutárico). Este proceso, que se ilustra para este par de sustancias, puede funcionar para muchos otros pares de cetoácidos y aminoácidos; recibe el nombre de transaminación y permite el intercambio de unos aminoácidos en otros.

Por otra parte, los aminoácidos pueden perder su grupo amínico mediante otros procesos, liberando amoniaco (NH_3) y dando lugar a un cetoácido. Este proceso permite obtener cetoácidos diferentes, algunos de los cuales ya hemos mencionado, u otros que trataremos más adelante, como el piruvato, el oxalacetato o el cetoglutarato. El primero es el resultado final de la glucólisis y los otros dos son pasos intermedios del ciclo de Krebs. Es así que cuando los aminoácidos pierden su grupo amínico, el residuo se puede incorporar a diferentes caminos metabólicos para su degradación (figura II.9).

Otro hecho importante en el metabolismo de las proteínas es el destino del amonio que pierden al desaminarse. Depen-

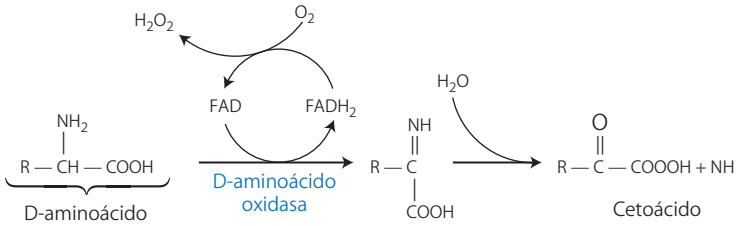
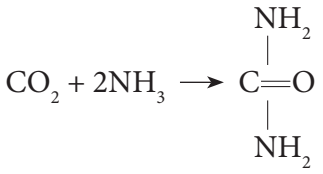


Figura II.9. *La desaminación. Los aminoácidos también pueden perder su grupo amínico y convertirse en cetoácidos.*

diendo de los organismos, éste se puede eliminar como tal o como otros compuestos. En el ser humano, gran parte del amoniaco, que le resulta tóxico, se elimina después de unirlo con CO_2, para formar una molécula inerte, la urea:



Finalmente, también hay enzimas capaces de sintetizar aminoácidos a partir de cetoácidos y amoniaco, como la deshidrogenasa glutámica, que es capaz de aminar, es decir, ponerle un grupo amínico en lugar del cetónico al cetoglutarato.

El ciclo de los ácidos tricarboxílicos

Ya mencionamos que de los principales componentes que obtenemos con los alimentos —azúcares y grasas, sobre todo, pero también de las proteínas— es posible obtener moléculas como el piruvato, y a partir de éste la acetil CoA. Ésta, a su vez, puede provenir directamente de las grasas.

En la figura II.10 se muestra otro camino metabólico cíclico: el ciclo de los ácidos tricarboxílicos, que puede alimentarse con acetil CoA, y tiene algunas características importantes, que señalamos a continuación:

a) Se lleva a cabo en la mitocondria; sin embargo, en los organismos procariontes tiene lugar en el citoplasma.
b) Termina en el mismo producto en que se considera que se inicia, el ácido oxalacético u oxalacetato, el cual puede

unirse otra vez con una molécula de acetato de la acetil CoA.
c) En el proceso, los dos átomos de carbono del acetato salen como CO_2.
d) Entre los productos del ciclo se forman cuatro pares de hidrógenos, que pueden ser utilizados para llevarlos al oxígeno y de esta manera sintetizar ATP.
e) Muchos de los intermediarios del ciclo se pueden formar de otras sustancias; por ejemplo, el cetoglutarato del glutamato, o el oxalacetato del aspartato. El ciclo puede ser el mecanismo de conexión de diferentes vías metabólicas.

Al margen de otras funciones, tal vez la principal es la de servir como una especie de fuente muy eficaz de pares de hidrógenos, para que al entregar éstos a la cadena respiratoria se sintetice ATP. De cada par de hidrógenos, la mitocondria puede obtener entre dos y tres moléculas de ATP, de manera que es parte fundamental en los mecanismos de conservación de la energía, que se verán al hablar de las mitocondrias y los cloroplastos.

Unas vías están conectadas con otras

De manera muy simple hemos señalado las transformaciones que sufren algunas moléculas, como la glucosa, los ácidos grasos y algunos aminoácidos. A partir de esta descripción, pareciera que todas estas sustancias tienen caminos metabólicos definidos que las llevan a tal o cual producto, pasando por esta o aquella sustancia intermedia. Pero no es éste el caso; cada molécula o grupo de ellas puede participar en una vía, y no necesariamente seguir el camino que hasta ahora hemos señalado. Incluso, en un mismo individuo o especie es posible cambiar las condiciones de su vida o su alimentación, y que de ahí se produzcan cambios también en la dinámica de sus vías meta-

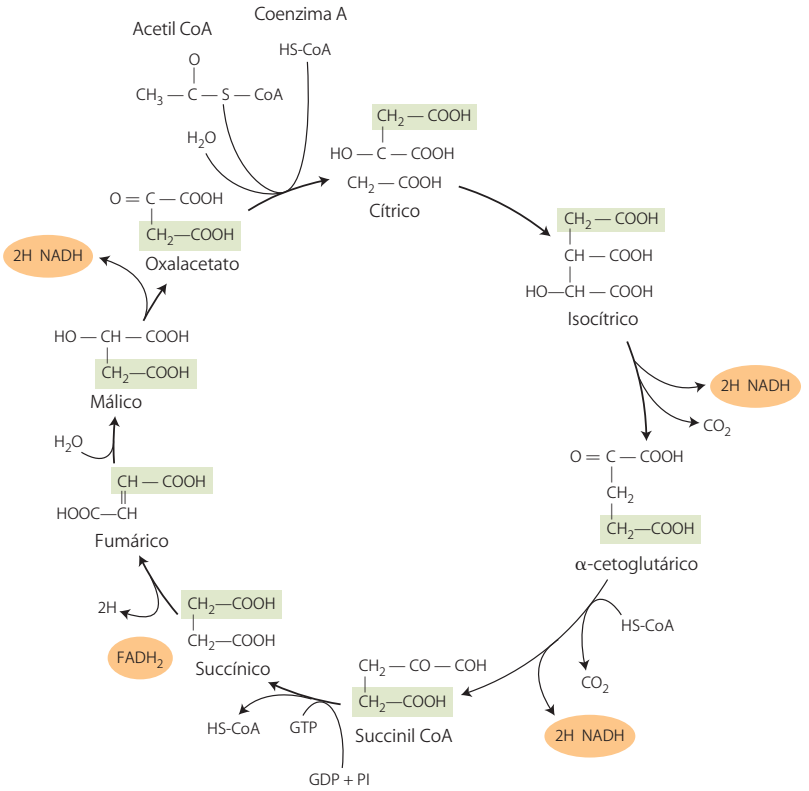


FIGURA II.10. *El ciclo de los ácidos tricarboxílicos. Esta especie de molino metabólico produce hidrógenos (una importante fuente de energía para la síntesis de ATP), que van a la cadena de transporte de electrones de las células, y produce también CO_2, a partir de muchas moléculas que provienen de diferentes partes del metabolismo.*

bólicas. Es aquí donde surgen las conexiones entre las vías metabólicas, y a manera de ejemplo señalaremos algunas de ellas.

Un caso que ilustra esta situación es la conexión entre el metabolismo de las grasas y el de los azúcares. El alimento de una persona se compone en buena parte de carbohidratos (pan, pastas, cereales, leguminosas, etc.). En alguien que come lo jus-

to, los azúcares provenientes de esos carbohidratos —que le proporcionan la mayor parte de la energía para realizar sus funciones— entran en su mayor parte a las vías que ya señalamos, la glucólisis y el ciclo de los ácidos tricarboxílicos, y se degradan totalmente hasta CO_2 y H_2O, para producir ATP. Como los alimentos se consumen metabólicamente en función del gasto de ATP, cuando dicho gasto decrece también disminuye la velocidad con que se utilizan los alimentos, y algunos productos del metabolismo de los azúcares se acumulan; cuando eso sucede, aunque hay sistemas reguladores muy específicos, uno de los caminos que quedan a las moléculas sobrantes o acumuladas es la síntesis de ácidos grasos y grasas. Al menos en algunos animales, como los cerdos, e incluso algunos humanos, la capacidad de acumulación de grasas es enorme y se realiza por la transformación de azúcares en ellas. Otro ejemplo de esto es la acumulación de las grasas (aceites) en algunas semillas; estos aceites se forman en las plantas por los azúcares sintetizados durante la fotosíntesis.

Otro caso que podemos imaginar es el de una persona que no consume carbohidratos, como puede darse en ciertas dietas; incluso, existe un grupo étnico completo que prácticamente se alimenta a base de una dieta de proteínas y carbohidratos: los esquimales. En estos individuos, las grasas se oxidan para obtener energía, pero muchos tejidos requieren de glucosa para funcionar. Su organismo resuelve el problema al intensificar algunos caminos metabólicos que permiten la transformación de los aminoácidos en glucosa y otros azúcares.

La regulación del metabolismo; el control por el ADP (el trabajo)

Dado que muchas de las vías, como la glucólisis, tienen como uno de sus componentes al ADP, algunas de sus reacciones no

pueden proceder a falta de éste, o al menos se dan con más lentitud si el ADP se encuentra en cantidades limitadas. Éste es el caso, por ejemplo, de una persona que no hace ejercicio físico, caso en el cual la glucólisis avanza con lentitud; además, los mecanismos de regulación permiten que la glucosa se convierta en piruvato y acetil CoA, lo que finalmente ocasiona la síntesis de grasas, único grupo de sustancias que puede acumularse.

Pero también hay caminos metabólicos que tienen mecanismos de regulación muy variados y numerosos en algunos de sus pasos. En muchas ocasiones, las enzimas —encargadas de catalizar alguno de los pasos del metabolismo— son susceptibles de modificaciones en su función debido a moléculas que algunas veces están cerca en los esquemas metabólicos; pero en otras, sucede que pueden ser inhibidas o estimuladas por moléculas lejanas o ajenas a la propia vía regulada.

También hay otros factores que pueden modificar la velocidad de funcionamiento de una vía metabólica. Los organismos cuentan con moléculas diseñadas específicamente para regular muy diversas funciones celulares por diferentes mecanismos. Se trata de las hormonas, sustancias producidas por tejidos u órganos específicos llamados glándulas que son capaces de modificar la función de otras células a distancia.

Las hormonas pueden cambiar de diferentes formas el funcionamiento de otras células, pero más específicamente el metabolismo. Es el caso de la insulina, producida por el páncreas de los animales superiores, que tiene la propiedad de estimular el paso de la glucosa a través de las membranas de muchas de las células. De esta manera, la hormona puede regular la glucólisis y demás vías que le siguen, gracias a la asequibilidad de la primera sustancia que alimenta la vía. Otras hormonas tienen efectos más complicados pues pueden actuar de manera directa, como ciertos esteroides, al unirse a las moléculas que forman los cromosomas y permitiendo la expresión de ciertas

regiones del ADN y con ello la síntesis de determinadas proteínas.

Para otras hormonas existen receptores específicos en las membranas de las células así como mecanismos de transmisión de señales resultantes de su presencia y complicadas acciones subsecuentes en el interior de la célula. Pongamos el ejemplo de la adrenalina que, sin penetrar a la célula, a través de su receptor puede estimular en el hígado —por una molécula que actúa como su mensajero (llamada segundo mensajero)— la degradación del glucógeno almacenado y así liberar glucosa a la circulación. Éstos son sólo algunos ejemplos de los mecanismos y casos de regulación del metabolismo por las hormonas.

Variaciones de las vías

De modo superficial hemos descrito una forma de degradación de la glucosa, la glucólisis, que parte a la molécula en dos fragmentos iguales, dos moléculas de piruvato o de lactato. Mencionamos que esto sucede durante el ejercicio muscular intenso, y permite obtener con rapidez grandes cantidades de ATP. Sin embargo, hay diversas variantes de esta vía; tal vez la más importante, por su repercusión en la vida diaria, sea la fermentación, la cual de hecho dio lugar al estudio del metabolismo hacia finales del siglo xix, cuando los Buchner describieron que las células rotas de levadura eran capaces de transformar la glucosa en alcohol etílico. La diferencia entre la glucólisis y la fermentación estriba en que, en esta última, el paso que se da en los animales, que convierte al piruvato en lactato, es sumamente lento y en su lugar hay otra enzima que convierte al piruvato en acetaldehído, y otra a éste en alcohol, como se muestra en la figura ii.11.

La importancia de la fermentación estriba en que, en primer lugar, es la vía metabólica responsable de la producción de

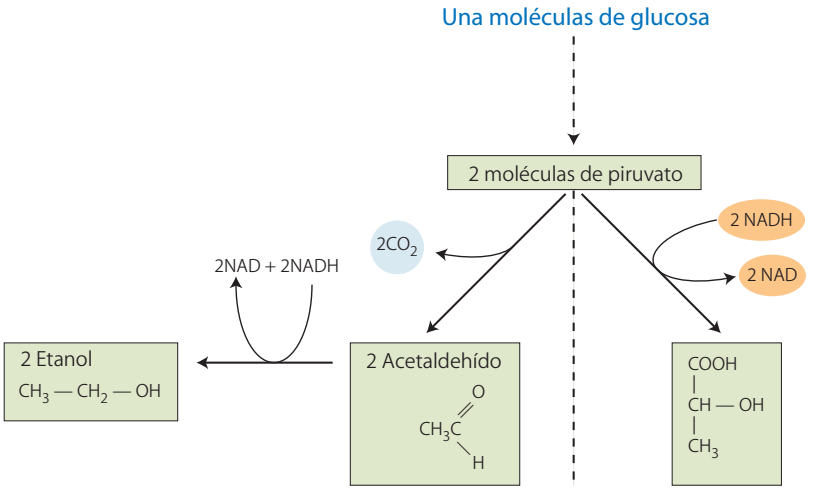


FIGURA II.11. *La fermentación como una variante de la glucólisis.*

los cientos de bebidas alcohólicas que existen en el mundo. Al margen de los beneficios económicos que las bebidas alcohólicas aportan, el alcohol en sí es un solvente de gran importancia industrial, también utilizado como sustituto de la gasolina. Otro hecho importante es que, por la transformación del piruvato en acetaldehído, se produce el gas CO_2, por lo que al mezclar levadura con masa de harina, en ésta se producen pequeñas burbujas que durante la cocción se dilatan y permiten la elaboración del pan.

Es así que, desde tiempos bíblicos, con el pan y el vino se utilizaba una variante de una vía metabólica para el beneficio del ser humano.

Asimismo, la fermentación puede modificarse al interrumpirla a medio camino para lograr la producción de glicerol a partir de la glucosa; este método se utilizó en la primera Guerra Mundial para la producción de nitroglicerina. Otra variante más ocurre en algunos microorganismos que pueden producir ácido acético y que se utilizan en la producción del vinagre.

Estos ejemplos de variaciones de una vía metabólica para la producción de materiales útiles para los humano son sólo una muestra de la enorme diversidad de procedimientos en los cuales, aprovechando las diferencias naturales o provocadas de las vías metabólicas, se constituye la base de una gran parte de la moderna biotecnología.

III. Los componentes celulares

Aunque se han esbozado algunas funciones de los componentes celulares, en este capítulo se intentará detallar las principales funciones de las estructuras de una célula. Empezaremos de afuera hacia dentro, a partir de la pared celular, esa envoltura protectora que recubre a la membrana pero que no todas las células tienen, y terminaremos con el núcleo y el citosol. Debe quedar claro que no en todas las células existen los mismos componentes; por ejemplo, el cloroplasto sólo está presente en la célula vegetal. En las bacterias, por otra parte, sólo hay membranas y citosol, pues en éstas ni siquiera el núcleo tiene una estructura definida.

La pared celular y la protección de las células

Las bacterias, como muchos otros microorganismos, y las células vegetales están cubiertas por una membrana plasmática relativamente débil y semejante a la de muchas otras células. Sin embargo, por sus propias características de vida libre y por estar sujetos a una variedad muy grande de ambientes (muchos de ellos con un bajo contenido de sales) dichos organismos requieren, además de la membrana, de una pared protectora adicio-

nal. La figura III.1 es una micrografía de la pared celular del quiste de una amiba; ésta es una estructura de fibras entrecruzadas, todas de polímeros de azúcares, que sirven para proteger a esta forma de gran resistencia en esta etapa de la vida del parásito.

La pared celular funciona en parte como protección mecánica, pero su papel principal es proteger a la célula de los cambios en la presión osmótica interna, generada por la gran cantidad de sustancias que contiene, cuando en el exterior hay una baja concentración de sustancias disueltas. Hay que tener presente que las sustancias disueltas en cualquier célula se comportan como las moléculas de un gas comprimidas dentro de un tanque y generan una presión sobre la membrana. Si un microorganismo o una levadura, o el quiste de una amiba, se colocan en agua, se produce una presión interna de varias atmósferas, debido a la cantidad de sustancias disueltas en el interior. Si no existiera una pared adicional de gran resistencia, de inmediato se produciría la ruptura de la membrana celular. Para tener idea de la presión que se puede desarrollar en un microorganismo en esas condiciones, se le puede comparar con la del neumático de un coche, que se llena de aire a una presión aproximada de dos atmósferas. En este caso, la resistencia de la pared evita que estalle. En las células vegetales y en los microorganismos, la presión osmótica que se ejerce sobre la pared es mucho mayor: llega a ser del orden de 15 a 20 atmósferas cuando se les coloca en el agua. No es difícil imaginar la resistencia que debe tener la pared para evitar que la célula estalle. Podemos hacer un experimento que consiste en colocar levaduras en agua y observarlas en el microscopio; veremos que resisten perfectamente. Si hacemos lo mismo con los glóbulos rojos de la sangre (eritrocitos), veremos que, al no tener la pared celular, se hinchan primero y luego se rompen; podemos decir que estallan por la entrada de agua, resultado de la presión osmótica de sus solutos.

La naturaleza nos ofrece muchos ejemplos de la importancia de la pared celular. Numerosas células viven en medios hi-

Figura iii.1. *La pared celular del quiste de una amiba. Una resistente malla de fibras de azúcares polimerizados protege a estas y muchas otras células del daño que un ambiente adverso les puede causar.*

potónicos, prácticamente en agua pura; en el caso de las amibas, por ejemplo, la forma de transmisión de unos individuos a otros es el quiste, que, rodeado de su pared tan fuerte, puede resistir esas presiones. Los antibióticos más conocidos, la penicilina y muchos de sus derivados, actúan bloqueando la síntesis de los componentes de la pared celular de algunas bacterias. En presencia del antibiótico, éstas se desarrollan sin esa protección y mueren en ambientes de menor presión osmótica.

La membrana celular

Como ya se mencionó, durante mucho tiempo se consideró a la membrana celular como una estructura inerte, si acaso con poros más o menos específicos para la entrada y la salida, mediante mecanismos poco claros, de los diferentes materiales que la

célula debe expulsar o captar del medio en que se encuentra. En la época moderna este concepto ha cambiado (véase la introducción), y el modelo actual es el de una estructura fundamental, constituida por fosfolípidos, en la cual se encuentran embebidas muchas otras moléculas, sobre todo proteínas, que tienen diferentes funciones.

El lector interesado puede consultar en esta misma colección el volumen 18, *Las membranas de las células,* donde se estudian con mucho más detalle las funciones de estas estructuras.

La mayor parte de las células mantiene en su citoplasma una composición y, casi siempre, una concentración de sustancias disueltas muy diferente del medio que las rodea; aun en las células de los animales superiores, que viven en un ambiente prácticamente sin cambios, la composición del citoplasma celular también es muy diferente de la del medio que las rodea. Hasta cierto punto es sencillo imaginar que la membrana de la célula impida la salida o la entrada de las moléculas de gran tamaño, como las proteínas, los ácidos nucleicos o los polisacáridos; pero la impermeabilidad es tal que también las moléculas pequeñas —que debido a su carga eléctrica están rodeadas de capas de agua— se mantienen de un lado o del otro de la membrana. Por lo anterior se requieren mecanismos especiales para el movimiento de sustancias hacia cualquier lado de la membrana, pero que al mismo tiempo puedan distinguir entre unas y otras; como es lógico, son muchísimas las moléculas o los iones que deben transportarse en ambos sentidos a través de las membranas. El caso más simple es aquel en que las sustancias cruzan la membrana del lado donde se encuentran en mayor concentración hacia aquel en que ésta es menor. Estos movimientos a través de las membranas se conocen con el nombre de *transporte.*

El fenómeno del transporte a través de una membrana puede ocurrir de manera muy sencilla. Para atravesar la doble capa de fosfolípidos que constituye la base estructural de la mem-

brana y la separación entre ambos lados, una molécula o un ion requieren de un *sistema de transporte,* o *acarreador,* o un *poro* específico, capaz de permitirle el paso de un lado al otro. Estos sistemas de transporte, para permitir el paso de la sustancia en cuestión, primero deben reconocerla entre un sinnúmero de otras moléculas que se encuentran en los líquidos que bañan a las células o que están en su interior.

El transporte puede tener dos variantes. En un caso se trata de una sustancia que ha de pasar de una mayor concentración a una menor, es decir, a favor de su tendencia natural, igual que las moléculas de una gota de tinta en agua que, por su energía cinética y el constante movimiento derivado de ella, se mueven de donde hay más hacia donde hay menos, para finalmente llegar a una concentración igual en toda la solución. Las moléculas de proteína son las que se encargan de estos procesos de transporte; es de esperar que el acarreador sea una molécula relativamente simple, que lo único que debe hacer es seleccionar las sustancias que deben pasar y dejar que lo hagan según su tendencia natural. En este caso hablamos de la existencia de sistemas de *difusión facilitada*.

Otra variante del transporte, que no es rara en las células y en los microorganismos, es aquella en la cual se captura una sustancia que se encuentra en el medio a una concentración relativamente baja, y se introduce en la célula, donde la concentración es mucho mayor. Tal vez el caso más frecuente sea el del ion del potasio (K^+), y el de otros materiales, que en el interior de muchas células se encuentran en concentraciones mayores que en el ambiente. Dado que aquí el transporte se realiza en contra del gradiente de concentración, los componentes de la membrana deben invertir energía para llevarlo a cabo. En numerosas ocasiones el sistema de transporte mismo es capaz de utilizar directamente la energía de la hidrólisis del ATP (adenosín trifosfato) u otras formas de energía para llevar a cabo su tarea. A estos transportadores se les llama *translocadores primarios;*

en la figura III.2 se ilustran las dos variantes de transporte que hemos descrito.

En *Las membranas de las células* se describen con mayor detalle estos y otros mecanismos generales del transporte a través de las membranas.

Al margen de la posibilidad de transportar sustancias en un sentido y en otro, previo reconocimiento de las mismas, las membranas tienen también la posibilidad de reconocer, con fines definidos, a otras sustancias para establecer comunicación con el exterior. Quizá el caso más claro y conocido es el de las hormonas, que en realidad constituyen un medio por el cual muchas células pueden recibir señales u órdenes del exterior; y no sólo eso, como consecuencia de la interacción con ellas producen respuestas concretas, como cambios fisiológicos o metabólicos, algunos de los cuales llegan a producir cambios profundos en un individuo. Un ejemplo de estos efectos es el de la insulina, hormona producida por el páncreas, que aumenta la velocidad con que la glucosa entra a las células, principalmente las musculares y las adiposas, con la participación de receptores específicos en la membrana celular. Al ser éste un mecanismo normal de modular el comportamiento metabólico de las células, cuando falta en forma total o disminuye la producción de la hormona los trastornos se traducen en el padecimiento llamado diabetes. En esta enfermedad, al no poder entrar la glucosa a muchas de las células, aumenta su concentración en la sangre y rebasa la capacidad del riñón para reabsorberla del plasma que filtra constantemente; ello da lugar a que esta sustancia se pierda por la orina, que al estar acompañada de agua, aumenta así su cantidad. Debido a que se pierde mucha agua y glucosa, los enfermos constantemente tienen sed y hambre y su organismo debe utilizar las grasas como fuente principal de energía. En resumen, la falta o deficiencia de una sola hormona produce cambios grandes y complejos en las células y en el organismo completo.

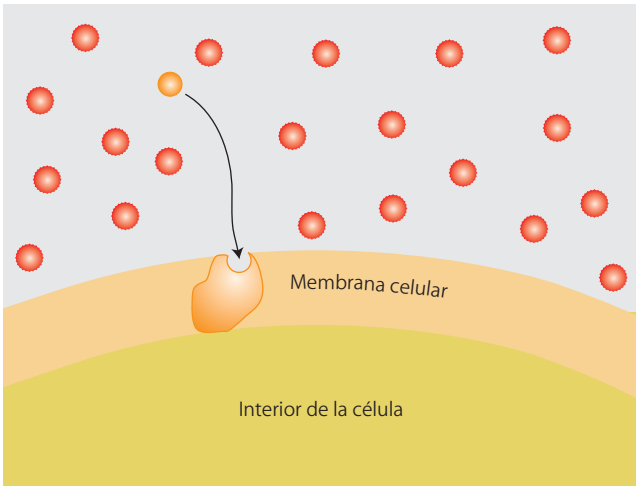


Figura III.2. *Un translocador o acarreador simple sólo reconoce a las moléculas que ha de dejar pasar, y les permite el paso a través de la membrana. Un translocador primario necesita de una fuente de energía, que puede ser el ATP o la derivada del transporte de los electrones. Otros acarreadores solamente son verdaderos poros que, sin embargo, pueden distinguir entre unas sustancias y otras.*

También existen sistemas especiales de reconocimiento que permiten la agregación de las células que son semejantes. Esta es la razón por la cual, por ejemplo, las células hepáticas o las renales se reconocen entre sí, pero además cuentan con mecanismos para adherirse entre ellas. Inclusive, organismos tan primitivos como las esponjas tienen sistemas de reconocimiento que permiten la adhesión de células de la misma especie y que impiden la adhesión entre otras diferentes.

Algunas membranas participan en funciones todavía más especializadas, como la movilidad de los leucocitos, las amibas y otros protozoarios con movimiento amiboide; las membranas de las mismas células musculares deben establecer contactos entre los materiales contráctiles del interior con la membrana para producir efectivamente la contracción o el acortamiento

de la fibra. En otras células, es papel de la membrana eliminar al exterior o tomar de él sustancias mediante la formación de vesículas que se producen al englobarlas; la *fagocitosis,* o *endocitosis,* y la *exocitosis* son ejemplos de este fenómeno; en la primera, la membrana envuelve a una partícula, sustancia o grupo de ellas, luego se cierra a su alrededor para finalmente formar una vesícula que se desprende de la membrana y pasa al citoplasma, creando una vacuola digestiva mediante la interacción de esa vesícula con un lisosoma (figura III.3). Es lógico suponer que funciones como las descritas implican la participación de muchos componentes, los cuales hacen de la membrana celular una estructura más compleja todavía.

En las bacterias, la membrana externa debe suplir la carencia de los organelos en su interior, con el fin de encargarse de un buen número de funciones que en otras células y organismos están asignadas a ellos. Como se verá más adelante, la fosforilación oxidativa y la fotosíntesis son funciones que se realizan en las mitocondrias y en los cloroplastos, respectivamente. Para que estas funciones se realicen es necesario un comportamiento o estructura membranosa cerrada, pero como las bacterias no cuentan más que con la membrana externa, es ahí donde tienen lugar. La semejanza entre la membrana externa de las bacterias y la membrana interna de las mitocondrias, además de otras evidencias, han dado lugar a que se considere, con cierto grado de certeza, que las mitocondrias y los cloroplastos son el resultado de la inclusión de bacterias en el interior de las células primitivas.

Los organelos celulares

Bajo la denominación de organelos celulares se incluye una serie de estructuras intracelulares como las mitocondrias, el retículo endoplásmico, o hasta el núcleo mismo. De alguna forma, en casi todos ellos la membrana es la base estructural o al me-

nos es uno de sus componentes principales. Para todos los organelos celulares ha sido posible definir su función principal dentro de la célula, y se continúa avanzando en el conocimiento de otras de sus funciones fisiológicas. El conocimiento actual del papel de cada una de estas formaciones celulares es suficiente para tener una idea de la distribución de funciones dentro de las células. Los organelos representan una forma de organización de la célula al encerrar en una membrana ciertos componentes y generar compartimentos para algunos procesos que de

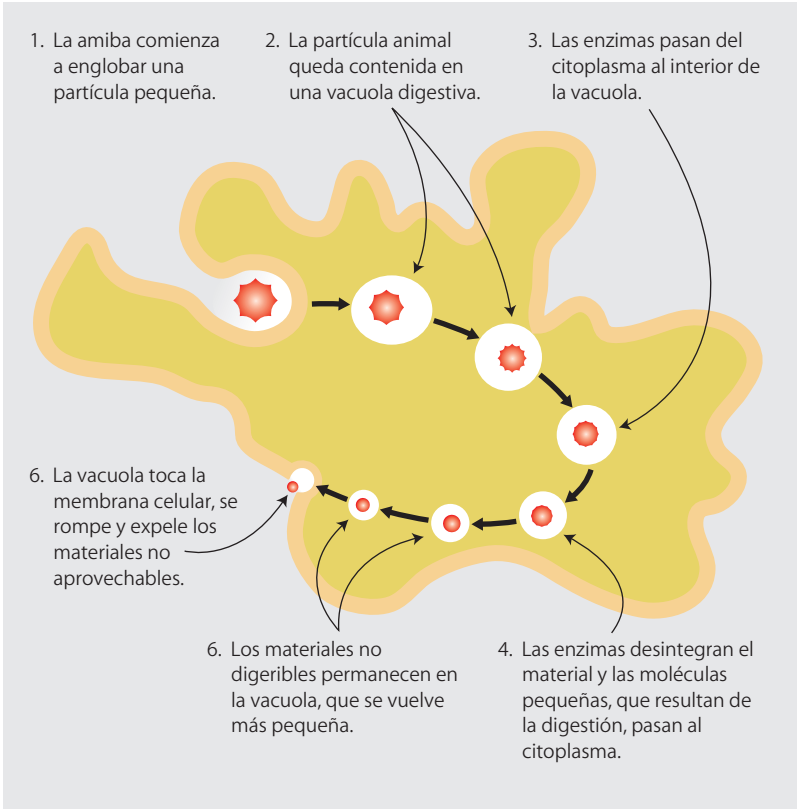

1. La amiba comienza a englobar una partícula pequeña.
2. La partícula animal queda contenida en una vacuola digestiva.
3. Las enzimas pasan del citoplasma al interior de la vacuola.
6. La vacuola toca la membrana celular, se rompe y expele los materiales no aprovechables.
6. Los materiales no digeribles permanecen en la vacuola, que se vuelve más pequeña.
4. Las enzimas desintegran el material y las moléculas pequeñas, que resultan de la digestión, pasan al citoplasma.

Figura III.3. *La fagocitosis. La célula engulle alguna partícula y luego la digiere en el interior de las vacuolas digestivas que se forman.*

otra forma se realizarían con menor eficiencia si las moléculas que los integran estuvieran distribuidas por toda la célula.

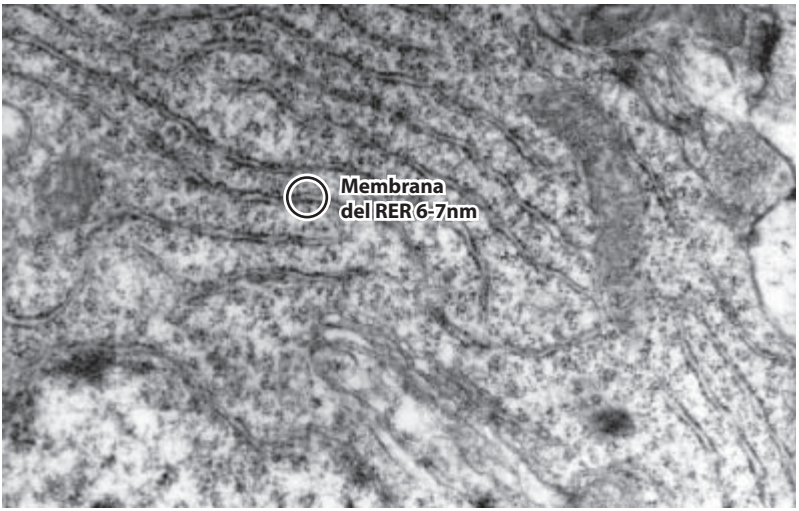
El retículo endoplásmico

El retículo endoplásmico es una formación que se encuentra en todas las células, y consiste en un conjunto de túbulos dispuestos en forma de red (retículo quiere decir "tejido en forma de red") y conectados unos con otros, que se distribuyen por toda la célula, pero representan un compartimento separado del citoplasma. Es posible distinguir dos variedades de esta estructura: el *retículo endoplásmico liso* y el *rugoso,* que se diferencian por su aspecto. Ambos presentan en la microscopía electrónica una imagen tubular, pero en el liso los contornos son suaves y continuos, y en la variedad rugosa la apariencia que le da su nombre se debe a la presencia de partículas más o menos abundantes a todo lo largo del contorno, que no son otra cosa que los ribosomas, estructuras supramacromoleculares que ya se describieron, cuya función fundamental es la de sintetizar las proteínas.

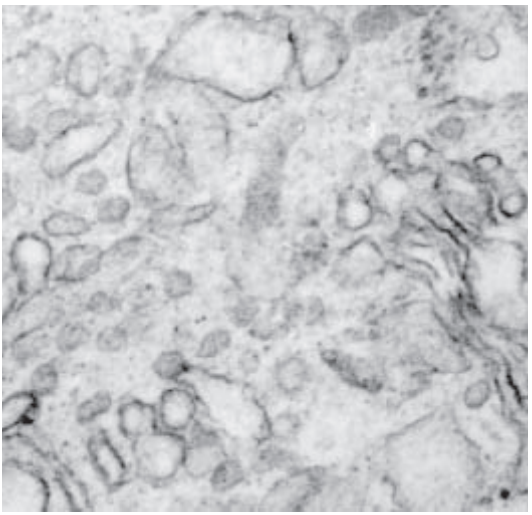
Debido a que en esta estructura se encuentran los ribosomas, y que la variedad rugosa es más abundante en los tejidos donde hay una actividad importante de síntesis de proteínas, sabemos —también a partir de muchos otros datos experimentales, uno de los cuales ha sido el aislamiento de los ribosomas y su estudio— que la actividad primordial del retículo endoplásmico es la síntesis de proteínas. En las células hepáticas, por ejemplo, hay un equilibrio entre las dos variedades de retículo endoplásmico. En la figura III.4 se presenta una micrografía electrónica de una zona donde predomina la variedad rugosa, y otra muestra la variedad lisa. Salvo por la ausencia de granulaciones, el retículo endoplásmico liso tiene la misma apariencia que el rugoso. En el hígado, por ejemplo, la variedad lisa se

vuelve más abundante cuando a los animales se les administran algunas sustancias tóxicas o medicamentos, y simultáneamente aumenta su capacidad para oxidarlas o inactivarlas. Si a esto agregamos que se han hecho estudios con el retículo endoplásmico aislado que demuestran que es el responsable de la transformación de numerosos tóxicos en sustancias inocuas, es fácil entender por qué al retículo endoplásmico liso se le ha asignado el papel de "destoxificar" algunas sustancias que pueden ser dañinas. Esta función, por otra parte, explica por qué muchas sustancias que ingerimos —sean tóxicas o benéficas, como los medicamentos— desaparecen o son transformadas y eliminadas al exterior, en su mayor parte por la orina. La abundancia de este sistema en algunos tejidos, así como en partes de la glándula suprarrenal y del testículo, que se encargan de producir constantemente hormonas de las llamadas esteroideas, ha permitido demostrar que en estos órganos el retículo endoplásmico liso participa de manera fundamental en tal proceso. También en este sistema membranoso parece residir una vía de síntesis para los ácidos grasos, principales componentes de la mayoría de los lípidos, así como de los fosfolípidos.

En el músculo, el retículo endoplásmico tiene una función especial que requiere de una disposición regular en relación con las miofibrillas; esto, aunado al hecho de que posee una enorme capacidad para transportar calcio, permite asegurar —con base en múltiples evidencias experimentales— que participa en el disparo de la contracción muscular. La regulación del proceso se hace mediante el secuestro o la liberación del ion calcio en el citosol, donde se encuentran las miofibrillas que lo requieren para contraerse. En la figura III.5 se presenta un esquema que muestra la regularidad del retículo endoplásmico liso en el tejido muscular, donde recibe el nombre de retículo sacroplásmico. Es necesario señalar, además, que las características funcionales de esta estructura varían según el tipo de músculo que se observe.



a)



b)

Figura III.4. *El retículo endoplásmico y sus dos variedades:* a) *el rugoso, cuyo aspecto se debe a que tiene los ribosomas, y* b) *el liso. Ambos, sin embargo, tienen otras funciones.*

Uno de los factores que ha hecho posible estudiar distintos tipos de retículo endoplásmico es la posibilidad de aislarlo. De acuerdo con el esquema de la figura 1(p. 14), se le puede separar de otros componentes celulares centrifugando a 105 000 veces la fuerza de la gravedad durante una hora. Con este procedimiento se obtienen vesículas que provienen del retículo endoplásmico y del aparato de Golgi, que a su vez se pueden separar mediante procedimientos más finos de ultracentrifugación, debido a que tienen diferencias ligeras en su densidad.

El aparato de Golgi

La figura III.6 es una micrografía electrónica de una célula en la que se observa una estructura membranosa polisacular (de muchos pequeños sacos), que al parecer proviene o está relacionada con el retículo endoplásmico, ya que en ella varias es-

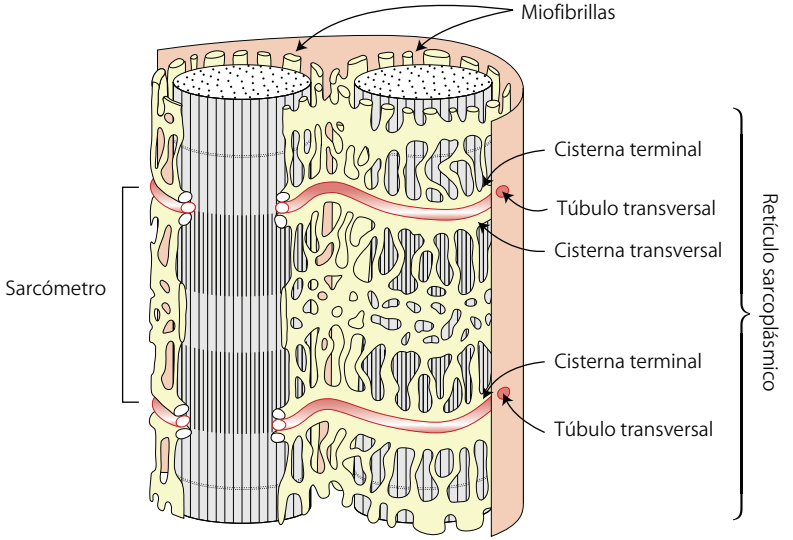


Figura III.5. *La disposición del retículo sacroplásmico en el músculo.*

tructuras vesiculares se apilan unas junto a otras, generalmente cerca del núcleo celular. Esta estructura también aparece en las células que tienen funciones secretoras, y recibe el nombre de aparato de Golgi, el cual a partir de las vesículas grandes cercanas al núcleo forma, con sus secreciones, vesículas más pequeñas que viajan luego hacia distintas regiones de la célula y se funden con otras membranas o vacían su contenido en ellas o al exterior. Esta estructura está relacionada con la producción de enzimas digestivas y se observa claramente, por ejemplo, en el páncreas, las células de la pared intestinal y otras glándulas.

Además, el aparto de Golgi se encarga de producir y distribuir las proteínas que sintetiza a todos los organelos celulares. Una vez sintetizadas las proteínas en el citoplasma, las procesa e incluye en vesículas que se dirigen específicamente a los distintos organelos de las células, a los que se incorporan para rea-

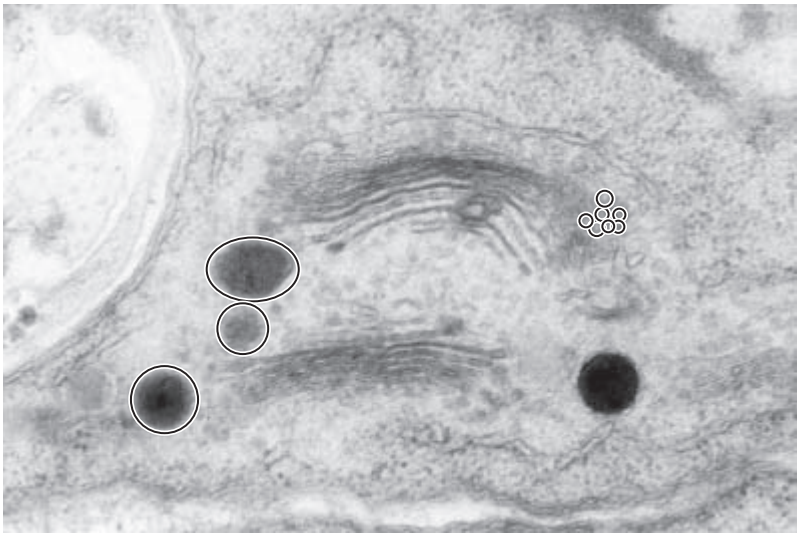


Figura III.6. *El aparato de Golgi y su función secretora. En él se forman pequeñas vesículas que son enviadas hacia fuera de la célula o a otros organelos.*

lizar funciones especiales ya sea en la membrana o en el interior de ellos.

Las mitocondrias y la energía celular

Las mitocondrias se pueden aislar puras; de hecho, fueron estos organelos los primeros en ser separados en grandes cantidades para su estudio, a partir de las células del hígado. Los mecanismos de transformación de energía que llevan a la síntesis del ATP, y que se conocen como *fosforilación oxidativa,* se iniciaron y se han realizado principalmente en estos organelos obtenidos sobre todo de dos fuentes: el hígado de rata y el corazón de res.

La figura III.7 muestra el esquema de la estructura de una mitocondria y una micrografía en la que se aprecia un conjunto de ellas. Se trata de un doble saco cerrado, es decir, que tiene una doble membrana, la *externa* y la *interna,* y entre ambas un espacio intermembranal. La membrana interna se pliega sobre sí misma y estos pliegues constituyen las llamadas *crestas mitocondriales,* que aumentan de forma notable su superficie, muy posiblemente para darle mayor extensión y capacidad funcional. El espacio dentro de la membrana interna recibe el nombre de *matriz mitocondrial.* Las mitocondrias tienen diferentes funciones, pero la principal es la fosforilación oxidativa; para llevarla a cabo, cuentan en su membrana interna con una complicada serie de moléculas encargadas de llevar átomos de hidrógeno y electrones —de diferentes sustancias que provienen de los alimentos— al oxígeno. El conjunto de tales moléculas se conoce como *cadena respiratoria*, o *cadena de transporte de electrones,* y es ahí donde en realidad reside la capacidad de los organismos para llevar a cabo la respiración de cada célula que, obviamente, al sumarse la de todas, se traduce en la respiración que observamos en los organismos multicelulares.

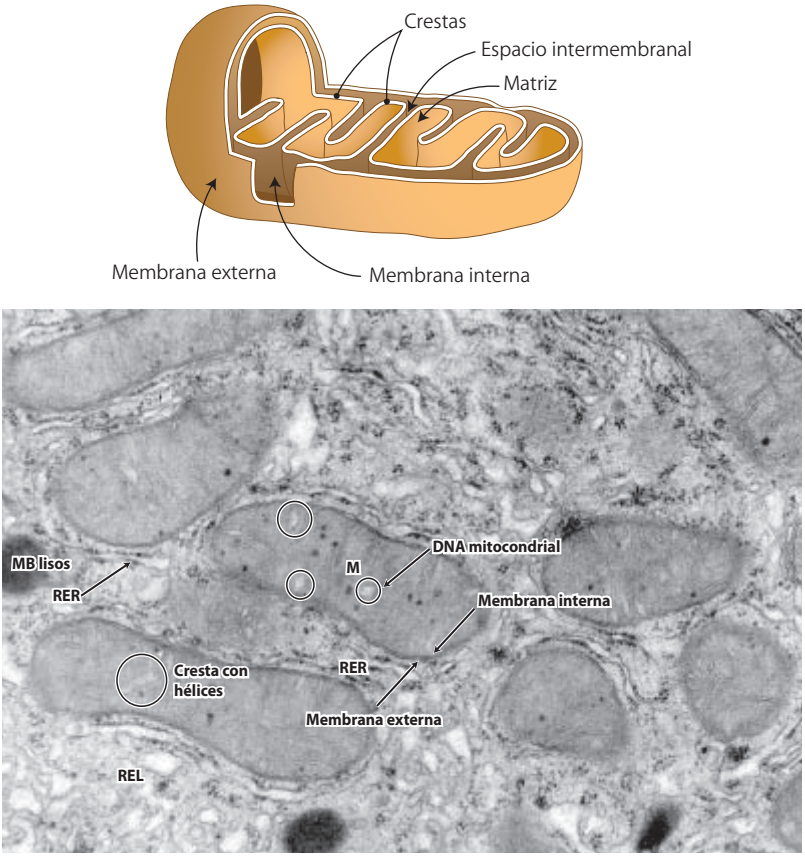


Figura III.7. *Estructura de una mitocondria y micrografía de un conjunto de ellas. Estos organelos están formados por dos membranas; la interna, que se encuentra plegada sobre sí misma, es el sitio donde se realiza la fosforilación oxidativa.*

La función de las mitocondrias en las transformaciones de energía y la síntesis del ATP comprende primero la producción de varias sustancias, mediante el proceso que se conoce como *ciclo de los ácidos tricarboxílicos,* que ya se describió en el capítulo II, también llamado *ciclo de Krebs* en honor del científico que llegó a integrarlo, y que tiene lugar en la matriz mitocon-

drial, es decir, dentro de la membrana mitocondrial interna. Además, es durante el ciclo de Krebs que las sustancias provenientes del metabolismo se convierten en CO_2.

Para llevar a cabo la fosforilación oxidativa y producir el ATP, una mitocondria hace lo siguiente:

a) De las diferentes sustancias que se producen en el ciclo de Krebs, toma átomos de hidrógeno (compuestos cada uno de un protón y un electrón) que pasan a la cadena respiratoria de la membrana interna, que los lleva gradualmente al oxígeno para unirlos con él y formar moléculas de agua. La energía derivada de ese transporte es utilizada para "bombear" protones o hidrogeniones (iones de hidrógeno H^+) al exterior, generando una diferencia de concentración de éstos entre el interior y el exterior de la membrana interna (véase la figura III.8). Dado que la membrana impide su regreso, la acumulación relativa de hidrogeniones en el exterior —y su tendencia a regresar— se convierte realmente en otra forma de energía que la célula puede utilizar, de la misma manera que un sistema adecuado puede aprovechar la energía del aire comprimido para convertirla en energía eléctrica o mecánica, por ejemplo.

b) La mitocondria cuenta con una proteína, que se presenta en el esquema de la figura III.8, la cual aprovecha la energía del regreso de los protones a través de ella misma para unir el adenosín difosfato (ADP) con un fosfato más, formando así el ATP.

Por la participación del oxígeno en este proceso se dice que la mitocondria es el lugar donde realmente se realiza la respiración de las células. La respiración de los organismos completos no es otra cosa que la suma de la respiración de las mitocondrias de todas sus células. El pulmón sólo toma del aire el oxí-

geno que necesita y lo envía por medio de la sangre a los tejidos y a las mitocondrias de sus células, y recoge el bióxido de carbono que producen.

Es así que las mitocondrias, de manera asombrosa y eficiente, se encargan de transformar la energía química de los enlaces químicos de los intermediarios del metabolismo, en los enlaces químicos de los fosfatos del ATP, que representa la forma de energía que directamente puede ser aprovechada por la mayoría de los procesos celulares que la requieren. Debido a esto, se habla de la mitocondria como "el cuarto de máquinas" de la célula.

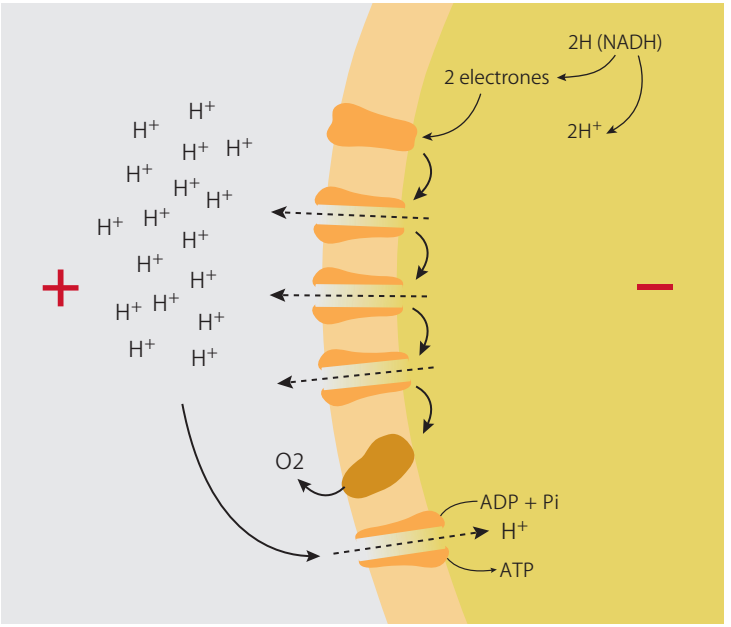


Figura III.8. *El mecanismo de la síntesis del ATP. A partir de la energía generada por el transporte y ulterior combinación con el oxígeno de los átomos de hidrógeno provenientes del metabolismo, se forma una diferencia de concentración de hidrogeniones entre el interior y el exterior de la mitocondria. La energía con que éstos tienden a regresar al interior es utilizada por una enzima, llamada ATP sintetasa, para producir el ATP a partir de sus componentes, el ADP y el fosfato.*

Además, al ser la mitocondria una estructura cerrada, debe contar con sistemas adecuados para transportar del exterior las sustancias que necesita para su funcionamiento. Cuenta con transportadores específicos y muy variados para el movimiento de muchas sustancias, entre las que destacan, desde luego, el ADP y el fosfato, que vienen del exterior, y el ATP, que debe salir para ser utilizado; además, hay una muy larga serie de otras sustancias necesarias, no sólo para la fosforilación oxidativa, sino también para otras funciones, cada una de las cuales tiene un sistema de transporte.

Como ya se mencionó, además de la fosforilación oxidativa, la mitocondria realiza otras funciones. Una de las más importantes es la fragmentación de los ácidos grasos (véase el capítulo II), que son moléculas largas formadas por una cadena de unos 16 a 18 átomos de carbono e hidrógeno. A partir de los carbohidratos, el material que recibe la mitocondria es el ácido pirúvico (en forma de piruvato). De la degradación de las proteínas recibe aminoácidos, los cuales debe modificar para aprovecharlos en el ciclo de Krebs; para este proceso requiere una gran variedad de enzimas con el fin de transformar todas estas moléculas en fragmentos de dos átomos de carbono, principal fuente de alimentación de este sistema metabólico.

Los cloroplastos

Las mitocondrias son a la fosforilación oxidativa lo que los cloroplastos son a la fotosíntesis; esta última función es una de las más importantes no sólo para las plantas, sino para todo el mundo biológico. Prácticamente toda la energía de que depende la vida se obtiene del Sol mediante el proceso de la fotosíntesis. Pero no sólo eso, la fotosíntesis es también el origen del oxígeno de nuestra atmósfera, que es uno de los productos de dicho proceso.

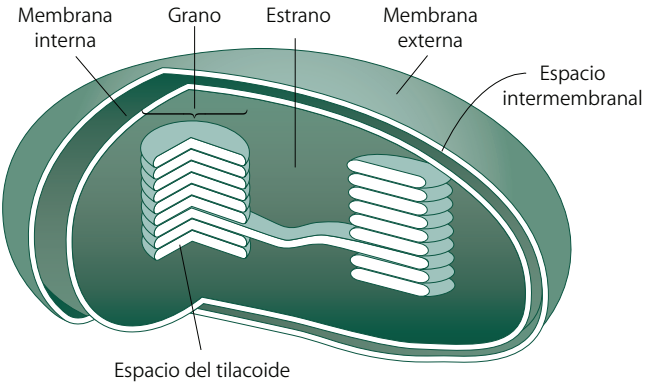
Los cloroplastos son estructuras cerradas, constituidas por un doble sistema de membranas. La figura III.9 muestra una micrografía electrónica de uno de estos organelos y un esquema de su organización estructural. Como en el caso de la mitocondria, el sistema membranoso interno es más complejo que el externo, y forma estructuras cerradas llamadas *tilacoides,* constituidos por membranas que tienden a plegarse sobre sí mismas formando agregados llamados granos o grana. El cloroplasto es un poco más complicado que la mitocondria, pues suele contar con dos sistemas moleculares para la obtención de formas diferentes de energía: una es el ATP que ya conocemos, que sirve como fuente directa de energía, y la otra el NADPH (nicotín adenín dinucleótido reducido), una molécula cuya importancia radica en que puede recibir átomos de hidrógeno de un nivel energético mucho más elevado que el del agua, y puede utilizarse sobre todo para la síntesis de las moléculas de azúcares, pero también de grasas, proteínas y otras. En las mitocondrias, los átomos de hidrógeno y los electrones que participan en la fosforilación oxidativa, ya sea en el NADH o en el NADPH, son de un nivel energético no muy diferente al del hidrógeno gaseoso, y proporcionan la energía producida en su descenso por la cadena respiratoria hasta unirse con el oxígeno, a fin de sintetizar el ATP. En la fotosíntesis los electrones parten del agua, es decir, de un nivel energético bajo, de modo que para poder ser utilizados en la síntesis del ATP o producir hidrógenos de un nivel energético más alto, reciben la energía que un sistema complicado de moléculas toma de la luz solar.

A continuación se describe en forma sencilla el proceso de la fotosíntesis (figura III.10):

a) La fotosíntesis se inicia con un proceso en el que, con la energía proveniente de la luz, una molécula de agua se rompe para liberar oxígeno, dos protones (átomos de hidrógeno sin su electrón) y un par de electrones prove-

nientes de los hidrógenos del agua. Estos electrones son energizados por un *centro de reacción,* ubicado en la membrana del tilacoide, que los "eleva" a un nivel muy superior al que tenían en el agua, superior incluso al de los electrones del hidrógeno gaseoso.

b) Un sistema molecular llamado *fotosistema II* (semejante en su funcionamiento a la cadena respiratoria mitocon-



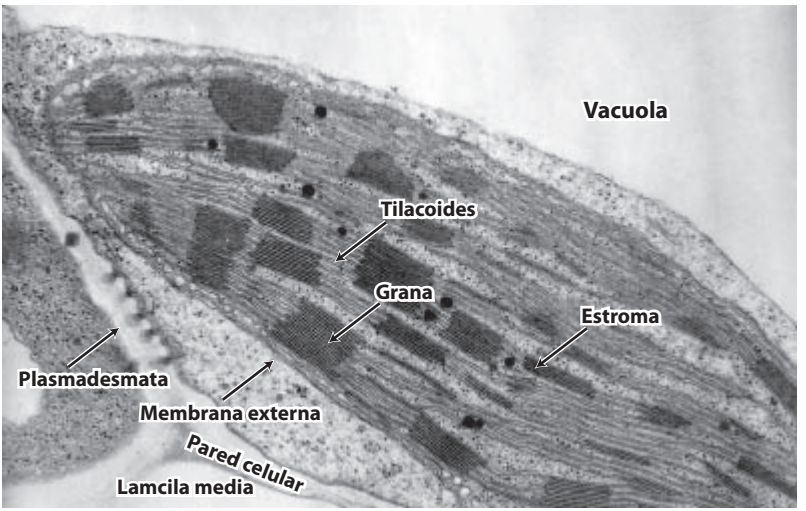


FIGURA III.9. *Estructura general y micrografía de un cloroplasto.*

drial, pero con diferentes componentes) transporta los electrones previamente energizados hacia un nivel más bajo de energía, lo cual produce un bombeo de protones en las membranas de los tilacoides, generando así una diferencia de concentración de éstos. También está acoplada al sistema una ATP sintetasa que, aprovechando la diferencia de concentración de los protones en ambos lados de la membrana y su regreso, cataliza la unión del ADP con el fosfato para sintetizar el ATP.

c) En otra fase, los electrones que han descendido de nivel para sintetizar el ATP son energizados de nuevo por la luz, ahora en el centro de reacción del *fotosistema I*, y toman luego un camino que los lleva finalmente a entregar los electrones al NAD, para producir la molécula llamada NADPH, cuya principal característica es tener dos átomos de hidrógeno disponibles para participar en la síntesis de los azúcares.

d) Una vez que en el proceso la energía solar es convertida en la energía de los enlaces del ATP, y que ha subido el nivel energético de los hidrógenos de la molécula de agua (ahora en el NADPH) ocurre lo que se señala en la parte inferior de la figura III.10, en la cual se muestra otro mecanismo que tiene lugar en el espacio intermembranal de los cloroplastos, y que se conoce con el nombre de *ciclo de Calvin,* en honor de Melvin Calvin, su descubridor. A partir de una molécula de azúcar, la ribulosa 5-fosfato, y con la utilización de tres moléculas de ATP y dos de NADPH por cada una de CO_2, tras una serie de pasos es posible llegar a una molécula de seis átomos de carbono, la fructosa 6-fosfato, que después puede convertirse en glucosa y en almidón. Es claro que este proceso debe repetirse varias veces (seis) para tener la ganancia neta de una molécula de azúcar, según la ecuación siguiente:

$$6H_2O + 6CO_2 \longrightarrow (CH_2O)_6 + 6O_2$$

Es claro que si la incorporación de una molécula de CO_2 requiere de tres de ATP y dos de NADPH, la síntesis de una molécula de glucosa, de seis átomos de carbono, requiere 18 de ATP y 12 de NADPH.

Finalmente, es necesario recalcar la distribución de los tres componentes mencionados; los fotosistemas II y I, que se encargan de la síntesis del ATP y del NADPH, respectivamente, se encuentran en la membrana del tilacoide. En el espacio intermembranal, que constituye la matriz del cloroplasto, es donde tienen lugar las reacciones del ciclo de Calvin, a partir de las cuales se da la formación de glucosa y almidón; este último compuesto requiere de un sistema muy complicado de reacciones que no tienen lugar en el cloroplasto, ni siquiera en la hoja de las plantas, sino en otros órganos como semillas, tubérculos, etcétera.

En resumen, el cloroplasto es el encargado de capturar la energía solar y convertirla o almacenarla en los enlaces químicos de los azúcares. Posteriormente, o bien los azúcares son utilizados por otros organismos, o dentro de la misma planta, y a partir de ellos se obtienen las proteínas, las grasas y otros compuestos que los organismos necesitan. Por último, aunque aquí hemos presentado el esquema general de la fotosíntesis en un cloroplasto, también —como para la fosforilación oxidativa en el caso de las bacterias fotosintéticas— la fotosíntesis se lleva a cabo en la membrana externa del microorganismo y la matriz interna.

La vacuola

Las células vegetales, y algunas animales, cuentan en su interior con una vesícula grande, la vacuola, que en algunos casos puede llegar a ocupar gran parte del volumen interno (véase la fi-

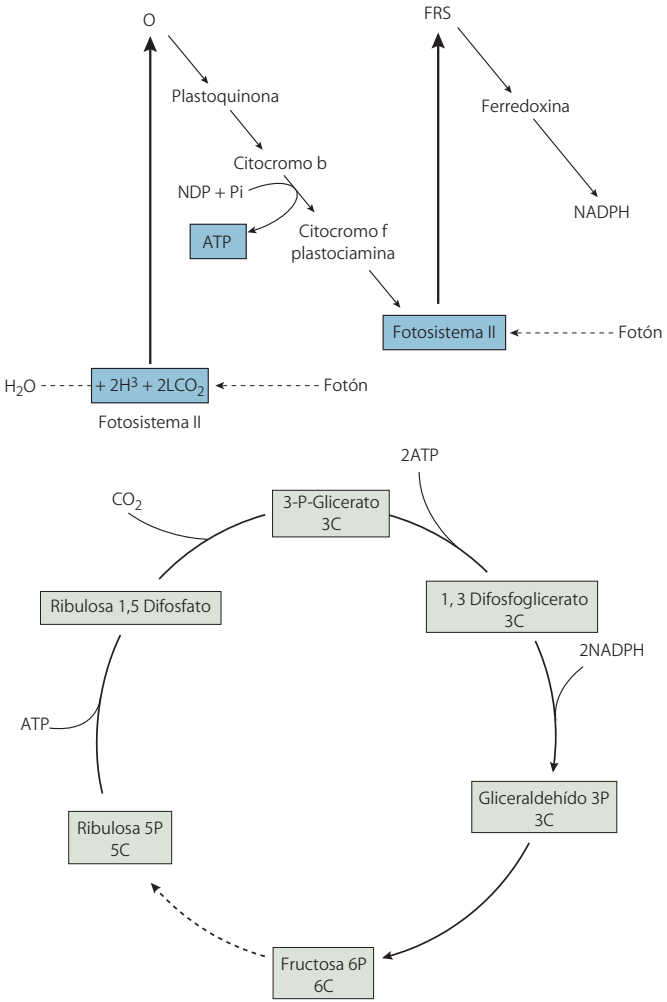


Figura III.10. *Esquema de la fotosíntesis. Con la energía de la luz se producen el ATP (en el fotosistema II) y el NADPH (en el fotosistema I). En la parte inferior se muestra cómo es que con el ATP y el NADPH que se producen en la fotosíntesis se incorporan luego los átomos de* CO_2 *a un azúcar. Los monosacáridos, como la glucosa, se pueden unir luego para formar almidón u otros azúcares, como la sacarosa en la caña de azúcar.*

gura III.11). La función de este organelo es almacenar distintos tipos de moléculas pequeñas, principalmente sales (iones) y aminoácidos; entre las primeras destacan el potasio, el fosfato y sus derivados, como pirofosfato o metafosfato, el calcio y otros iones de distintos tipos. Las vacuolas toman materiales que, o bien la célula necesita almacenar, o le son tóxicas, y también se encargan de guardar en su interior muchas sustancias que, sólo por la concentración que alcanzan y la presión osmótica que generan, podrían ser dañinas para la célula.

También algunos animales unicelulares, como los protozoarios, tienen vacuolas que pueden ser contráctiles. Las células parecen guardar en ellas materiales que les son dañinos o inútiles, y cuando se ha acumulado una cantidad importante de ellas, la vacuola se contrae y, por algún punto de contacto con la membrana externa, elimina su contenido al exterior.

Además, las vacuolas cumplen la función de digerir diversas sustancias que son tomadas del exterior por fagocitosis, co-

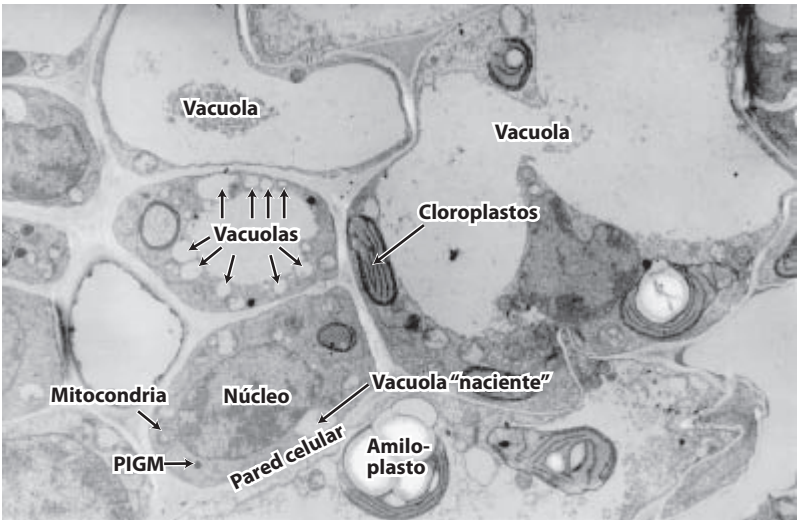


Figura III.11. *Micrografía de un tejido vegetal en el que se aprecian las vacuolas.*

mo sucede en muchos protozoarios, o del mismo interior de las células, y que les pueden ser útiles. Los materiales engullidos del exterior por endocitosis se depositan en vesículas que luego se funden con la vacuola para ser digeridos, y después los productos como azúcares, aminoácidos u otras moléculas son aprovechados por la célula.

Los lisosomas

Los lisosomas son estructuras membranosas cerradas, constituidas por una sola membrana y más pequeñas que las mitocondrias; en general se encuentran en las células animales, y sus funciones principales son digestivas. En la figura III.12 se presenta una micrografía electrónica donde se aprecian estas estructuras. Los lisosomas se pueden obtener en estado de pureza mediante métodos especiales de centrifugación que permiten separarlos de las mitocondrias; de otro modo, en los métodos simples de preparación se obtienen juntos. Cuando se les rompe colocándolos en agua, o por medio de algún detergente, estos organelos ponen en evidencia una serie de actividades enzimáticas muy diversas, capaces de romper por hidrólisis (introduciendo en algunos enlaces moléculas de agua) lípidos, carbohidratos, ácidos nucleicos, ésteres, etc. Ésta es una evidencia clara de sus funciones digestivas dentro de las células.

Estos organelos representan los elementos necesarios para degradar compuestos intracelulares poniendo en libertad las enzimas que contienen, que podríamos considerar como destructivas.

Otra función de los lisosomas tiene lugar en algunas células, como las amibas o algunos leucocitos, que cuando capturan del medio ambiente alguna partícula por fagocitosis forman una vesícula de la membrana plasmática a su alrededor. De manera similar a como se describió para la vacuola, esta vesícula se cierra y se internaliza; luego se funde con un lisosoma, y las

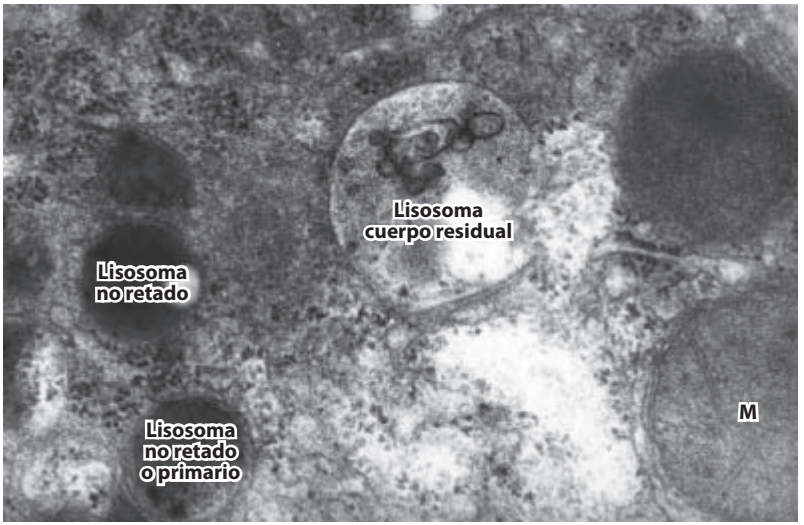


Figura III.12. *Micrografía de una célula en la que pueden apreciarse los lisosomas.*

enzimas de éste se encargan de digerir la partícula extraña (que puede ser una bacteria entera) que ha sido fagocitada.

Los centriolos

Los centriolos son dos cuerpos pequeños que se encuentran cerca del núcleo de las células y que tienen la capacidad de duplicarse antes de que se inicie la división celular. En las células ciliadas o flageladas, la duplicación continua de los centriolos representa el origen de los cuerpos basales, que luego dan lugar a los cilios y flagelos y a sus llamados centros cinéticos o de movilización. De alguna forma, los centriolos participan en el movimiento de estos componentes de la célula.

Estas características han permitido que se asigne a estos corpúsculos una serie de importantes actividades en la organización del movimiento interno de distintos componentes de la

célula. En la figura III.13 se muestra una micrografía electrónica en la que se puede apreciar un centriolo.

Los microtúbulos y los microfilamentos

Estas estructuras, como indica su nombre, representan formaciones de apariencia tubular o filamentosa que se encuentran en el interior de prácticamente todas las células; sus características y disposición algunas veces son constantes y otras variables. Se encuentran en el citoplasma, ya sea aislados o asociados con centriolos, cilios y flagelos. Los microtúbulos (figura III.14*a*) están compuestos, entre otras, por proteínas llamadas tubulinas, y tienen la capacidad de contraerse; participan en el movimiento celular primitivo, como el de tipo amiboide de las amibas y los glóbulos blancos, por ejemplo. También intervienen en los movimientos del citoplasma celular, en la llamada ciclosis, en el movimiento de sustancias, y hasta de vesículas dentro de las células. Los centriolos, que tan importante función tienen durante la división celular, pues parecen dirigirla, están formados por microtúbulos. Durante esta etapa de la vida celular, los microtúbulos se asocian para constituir haces más gruesos que constituyen el huso acromático.

Los microfilamentos son estructuras semejantes a los microtúbulos, formadas por distintos tipos de proteínas, de las cuales las más conocidas son la actina y la miosina, que se encuentran en el músculo. Estas estructuras han sido objeto de muchísimos estudios que han llevado a saber que son las responsables de la contracción muscular. Las fibras de actina y de miosina se deslizan unas sobre otras, al tiempo que rompen el ATP para producir, con su energía, el acortamiento de las fibras y de las células que las contienen. En la imagen de la figura III.14*b* se aprecia la estructura microfilamentosa respon-

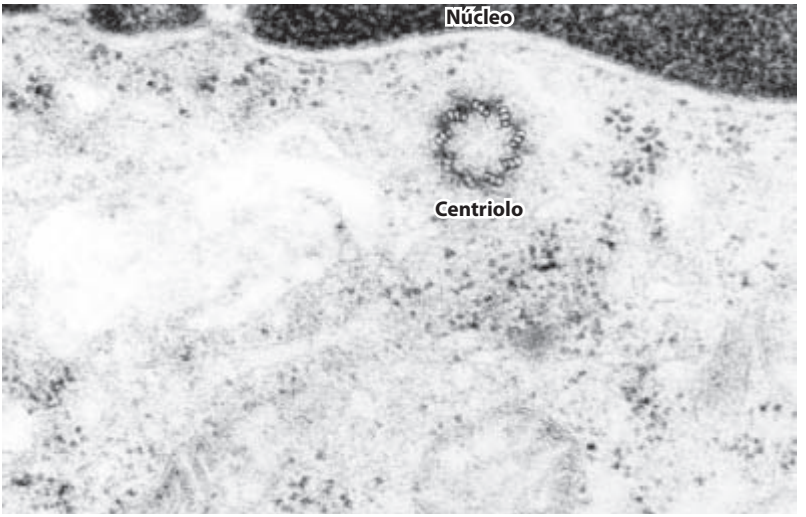


Figura III.13. *Micrografía de una célula en la que se ven los centriolos.*

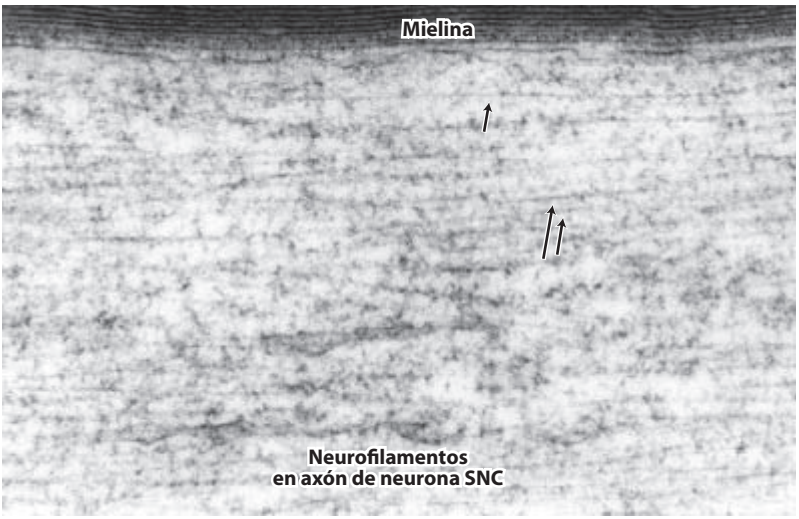
sable de la contracción. No está por demás señalar que los microfilamentos de las células musculares son estructuras cuya única capacidad consiste en contraerse y relajarse, pero que insertados sobre nuestros huesos y otras estructuras, y mediante contracciones coordinadas por el sistema nervioso, nos permiten realizar los movimientos más finos de que somos capaces.

No sólo las células musculares se mueven; es bien conocido, por ejemplo, el movimiento amiboide de los leucocitos y las amibas. Así, todas las células realizan sus movimientos por medio de microfilamentos contráctiles. Sin embargo, todavía estamos lejos de llegar al conocimiento total de los mecanismos del movimiento interno de las células.

El núcleo

El núcleo se considera el centro de gobierno de las funciones celulares; suele ser una de las estructuras más voluminosas de

a)



b)

Figura III.14. a) *Micrografía de un microtúbulo de un protozoario y* b) *de un microfilamento de una célula nerviosa.*

las células, separada de manera imperfecta del resto del citoplasma por una membrana que muestra grandes poros (véase la figura III.15). En las micrografías electrónicas es relativamente fácil observar estos poros; sin embargo, al estudiar las propiedades de la membrana nuclear se ha comprobado que no obstante la presencia de gran número de discontinuidades, que se antojarían como orificios en la membrana nuclear, ésta es impermeable e incluso capaz de desarrollar una diferencia en el potencial eléctrico a ambos lados; aunque esta impermeabilidad y la diferencia de potencial no se observan en todas las membranas nucleares que se han estudiado.

El interior del núcleo, por otra parte, es una estructura relativamente uniforme cuando las células no se están dividiendo; en cuanto a su contenido, la parte más importante es el ADN y las proteínas que a él se asocian, así como las enzimas que participan en la duplicación del ADN y la transcripción, es decir, la síntesis de las diferentes moléculas de ARN a partir de la infor-

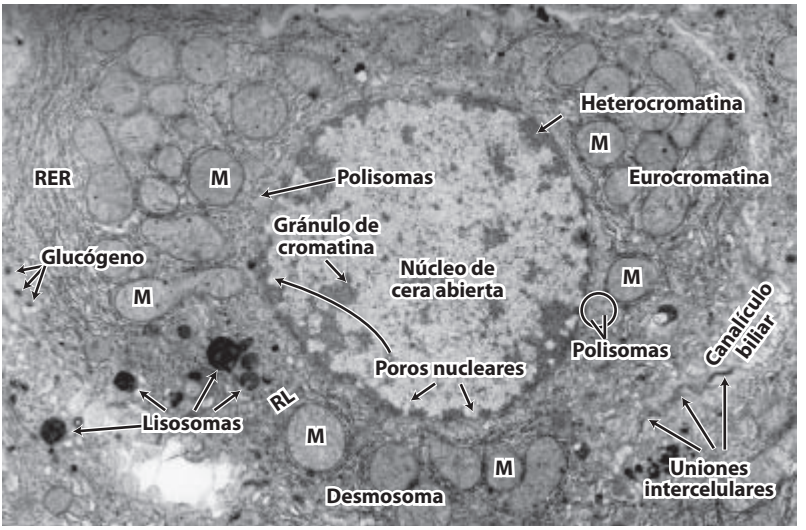


Figura III.15. *Micrografía de una célula en la que se ve claramente el núcleo.*

mación contenida en el ADN. Este último forma los *cromosomas,* que son las estructuras en que se agrupa, para organizar la información "escrita" que contiene en una especie de capitulado. Aún no se conoce con precisión cómo se organizan los cromosomas dentro del núcleo; sin embargo, durante la mitosis uno de los hechos más espectaculares es que la estructura nuclear como tal se desintegra, y es entonces que se pueden ver e identificar los cromosomas por su forma.

En el lapso en que las células no se están dividiendo, los cromosomas no son visibles y pareciera que todos se encuentran formando una masa uniforme y compacta en el interior del núcleo.

Sin embargo, mediante estudios más detallados se ha visto que las distintas regiones del ADN se "exponen" o "esconden" de las enzimas que lo pueden transcribir, lo que da lugar al ARN de distintos tipos, y de esta forma hay un mecanismo adicional para que se transcriban sólo las regiones expuestas, lo que en forma indirecta rige cuáles proteínas se sintetizan y cuáles no. Ésta es la forma en que se produce la diferenciación y especialización celulares; a pesar de que todas nuestras células tienen los mismos cromosomas y genes, no son los mismos los que se expresan en una célula hepática o en una muscular, o en una neurona.

La división celular

La división celular es uno de los fenómenos más espectaculares de la naturaleza. Aunque se le ha estudiado más desde el punto de vista morfológico, su bioquímica es también extraordinaria. Antes de que se inicie este proceso, tiene lugar la *duplicación* del ADN, que consiste precisamente en hacer dos copias *idénticas* del ADN, que irán a dar a cada una de las dos células hijas resultantes. También se elaboran las proteínas que lo recubren de modo que, antes de comenzar el proceso visible de la di-

visión celular, ya se han generado dos "juegos" de cromosomas. El paso siguiente es simplemente la porción visible del fenómeno que lleva a la separación de los cromosomas para las futuras células hijas, y a la división de la célula madre. La división celular es tan asombrosa que ha llamado la atención de cientos, o tal vez miles, de investigadores desde hace más de un siglo; además, da paso a la modificación e interacción concertada de prácticamente todo el interior celular.

Clásicamente se han distinguido varias etapas en la parte visible de la división celular, las cuales se muestran en forma esquemática en la figura III.16: en la primera de ellas, la *profase,* se observa que el contenido del núcleo adquiere la forma de un filamento grueso; al final de este estadio desaparece la membrana nuclear.

En la *metafase,* el filamento que se había formado se fragmenta para dar lugar a una clara definición de los cromosomas, que al ordenarse forman la *placa ecuatorial.*

En la *anafase,* etapa siguiente del proceso, se inicia la aparición de los *centriolos*, uno en cada polo celular, de donde irradian estructuras en forma de estrellas que no son otra cosa que microtúbulos que a través del microscopio se ven brillantes y dan el aspecto de un resplandor. En la anafase los cromosomas que han de corresponder a cada una de las células hijas se separan, y un juego emigra hacia cada polo de la célula madre.

Por último, durante la *telofase,* o fase final, la porción ecuatorial de la célula se empieza a estrangular para dar lugar a dos células que regresan a su estado original.

Es claro que en estas condiciones no todos los elementos participantes provienen del núcleo de la célula, pero al parecer el fenómeno depende de una actividad que tiene su origen en el núcleo, y que lleva a la formación de dos nuevas células, habitualmente con las mismas características que la célula madre.

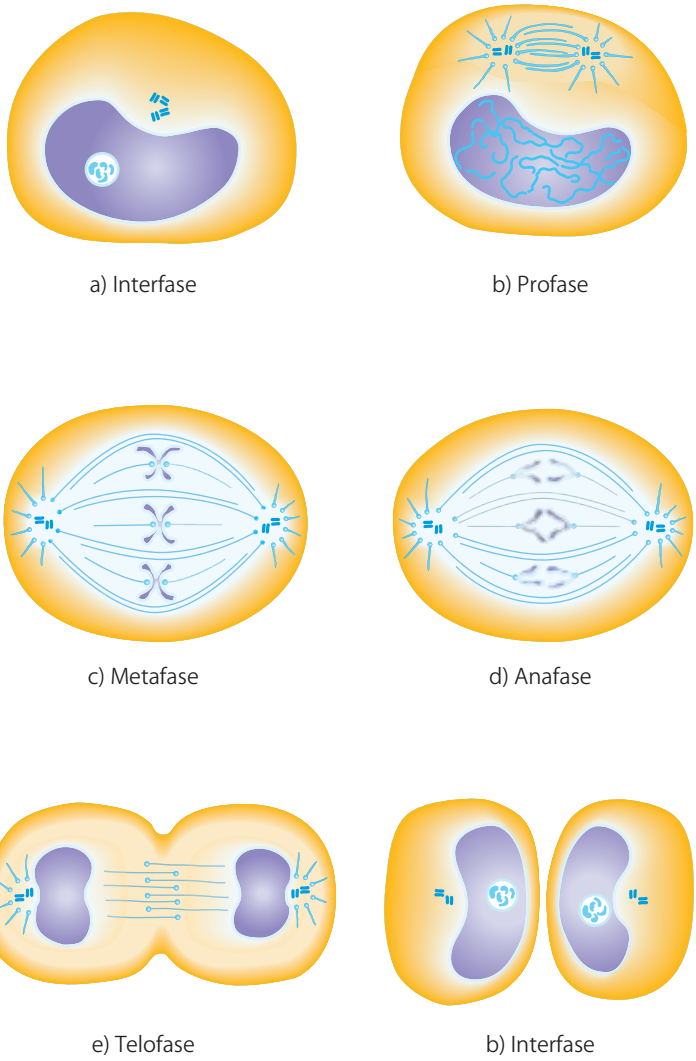


Figura III.16. *Esquema de la división celular y de sus fases.*

En cuanto a las funciones del núcleo, en él se llevan a cabo los principales fenómenos relacionados con la transferencia de la información genética y su utilización. En el núcleo se encuentra el ADN, que contiene todos los genes de la célula, y ahí tienen lugar los procesos de *duplicación* de esta molécula como fase preparatoria para la división celular. Es también en el núcleo donde se da la *transcripción,* es decir, el proceso en que se copia la información del ADN mediante la síntesis de cada una de las moléculas particulares de ARN que se necesitan para sintetizar cada una de las proteínas. Las moléculas de ARN son enviadas al citoplasma, que es donde finalmente tiene lugar la *traducción* de la información que contienen transcrita, es decir, la síntesis de las proteínas, a partir de la información enviada desde el núcleo. Para realizar estas funciones, el núcleo, junto con las moléculas de ADN y las proteínas a él asociadas, debe contar con un buen número de enzimas que se encarguen tanto de la duplicación como de la transcripción (figura III.17). También en el núcleo se encuentra un gran número de efectores que participan en la regulación de la síntesis de las proteínas; en este sentido, debemos recordar que hay mecanismos de *inducción* y *represión* de la síntesis de las enzimas y otras proteínas que la célula necesita.

Para la síntesis de las proteínas, la información genética contenida en el núcleo debe transferirse al citoplasma, para ahí "traducirse"; el mecanismo se muestra en la figura III.17. A partir del ADN nuclear se sintetiza el *ARN mensajero* (ARNm), que sale al citoplasma para ser utilizado por los ribosomas, y mediante un mecanismo muy simple convertir en proteínas la información que contiene. Por cada tres nucleótidos del ARNm se acomoda un aminoácido, que luego se une con otros para formar una cadena que constituye la proteína. Este proceso, como ya se señaló, tiene lugar en el retículo endoplásmico rugoso de

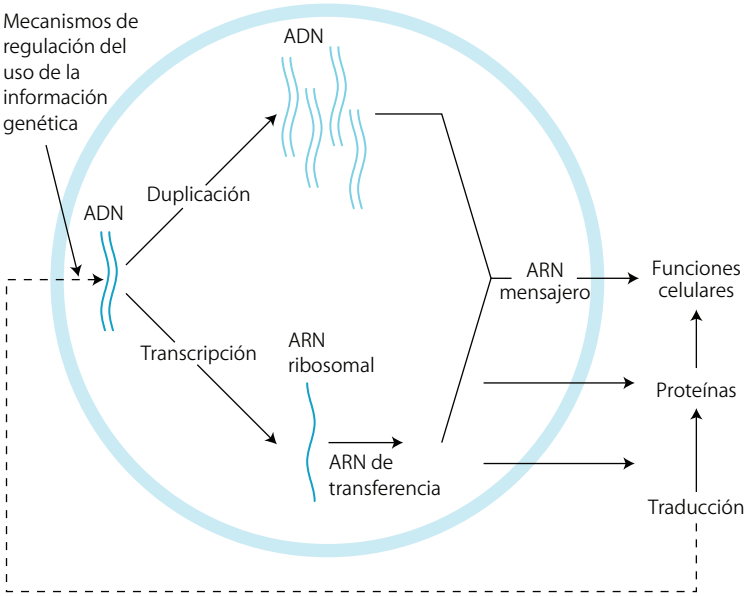


Figura III.17. *Esquema que muestra cómo se sintetizan las proteínas y otras capacidades, como la duplicación del ADN. El esquema y la nomenclatura comparan la síntesis de una proteína con el proceso de descifrar un mensaje que, además, tiene la capacidad de duplicarse.*

las células, y en él intervienen muchas moléculas y enzimas. Hay un *ARN ribosomal* (ARNr), y otro más llamado *ARN de transferencia* (ARNt), y todos participan para ir formando la cadena de aminoácidos, según la información que trae el ARN mensajero.

La diferenciación celular

Finalmente, hemos de tener en cuenta que no siempre una célula da lugar a otra exactamente igual; también hay mecanismos de diferenciación. Sólo pensemos que es a partir de una sola célula, el huevo, que se forman en un individuo células tan diferentes como las neuronas, las células musculares, las óseas,

los eritrocitos, etc. Son muchísimos y muy complejos, y en su mayoría desconocidos todavía, los mecanismos por los cuales tiene lugar este fenómeno.

El nucléolo

Dentro del núcleo también se encuentra un corpúsculo fácilmente identificable por medios ópticos: el nucléolo. Aunque todavía no se conocen todas sus funciones, sí se sabe que es el responsable de la síntesis del ARN de los ribosomas, el llamado ARN ribosomal, principal componente de esas partículas que desempeñan un papel central en la síntesis de las proteínas.

El citosol

El citosol no es un organelo ni puede considerase como tal; sin embargo, es necesario saber que no se trata de un simple ambiente inerte que sirve de asiento a los organelos y a otras estructuras celulares. El citosol es en primer lugar el componente más extenso de la célula, y contiene una cantidad enorme de enzimas, muchas de las cuales funcionan de manera concertada, constituyendo vías metabólicas. Por otra parte, el citosol es el paso obligado en el camino de miles de moléculas que van de uno a otro de los demás componentes de la célula.

Entre las vías metabólicas que tienen lugar en el citosol se encuentra la glucólisis, esa serie de reacciones que convierten a la glucosa en ácido pirúvico o láctico en algunas células, o en alcohol etílico en las levaduras, por ejemplo. Es ahí donde tienen lugar los cambios necesarios para llevar a muchas moléculas, o sus partes, hacia el ciclo de los ácidos tricarboxílicos.

Cuando las proteínas, o parte de sus componentes, se convierten en azúcares —como sucede durante periodos prolongados de ayuno—, utilizan gran parte de la misma vía, en un proceso que se llama gluconeogénesis, que también tiene lugar en

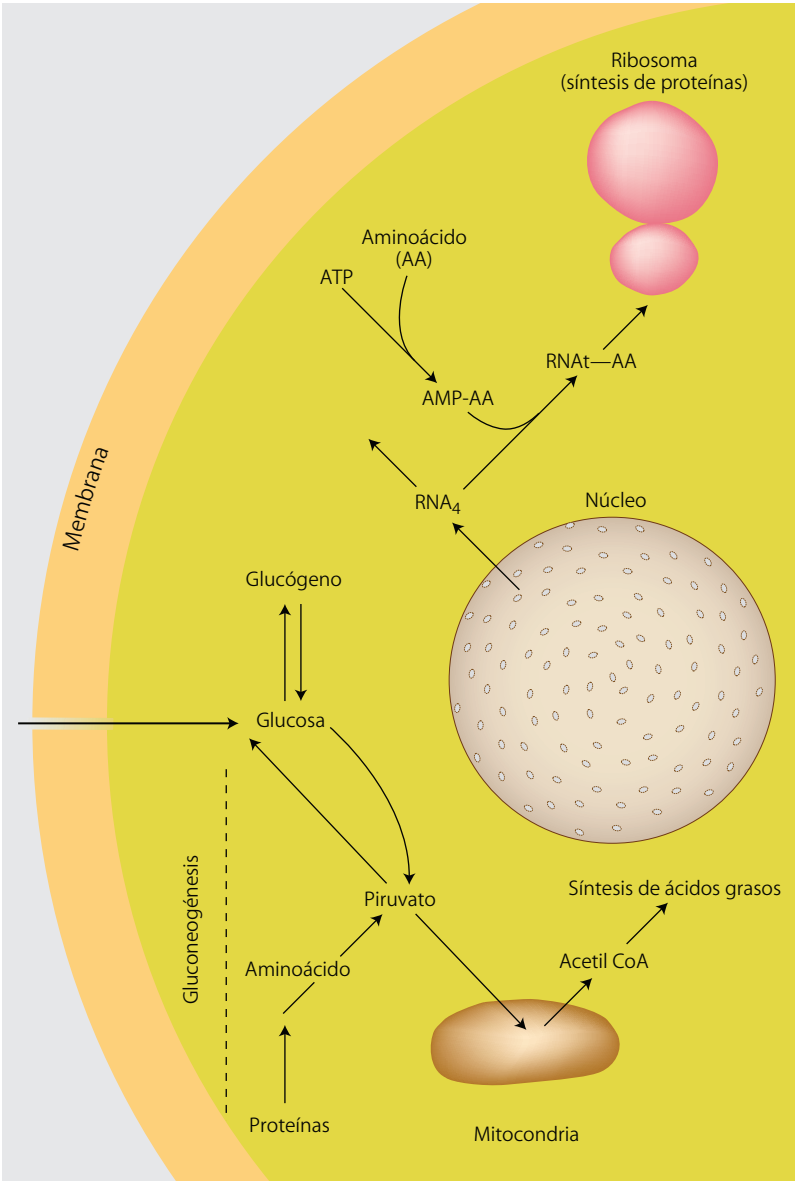


FIGURA III.18. *Esquema de algunas de las vías metabólicas que existen en el citosol.*

el citosol. La síntesis de los ácidos grasos cuenta con una vía organizada como un complejo multienzimático (supramacromolecular), que está en el citosol, pero particularmente en el retículo endoplásmico. Las vías preparatorias para utilizar los aminoácidos en la síntesis de las proteínas también se llevan a cabo en el citosol. Éstas son sólo unas cuantas de las tal vez cientos de vías metabólicas que siguen las células para producir los varios miles de moléculas que las constituyen; en la figura III.18 se presentan algunas de ellas.

No obstante el tamaño de una célula —y que lo descrito en este libro sólo representa una pequeñísima parte de las miles de reacciones que ocurren en su interior—, su organización y sistematización son tales que permiten, en tan pequeño espacio, uno de los fenómenos naturales más complejos que existen: la vida. Tal vez lo más asombroso del estudio de una célula sea percatarnos de que haya, aun en la bacteria más sencilla, en un espacio diminuto, tal cantidad de procesos tan finamente regulados y coordinados. No obstante lo que conocemos hasta ahora, no hay duda de que se requerirán muchos años todavía para llegar a conocerla en su verdadera profundidad.

IV. La especialización celular

En los capítulos anteriores hemos descrito, con algunas particularidades, las distintas funciones celulares, pero de tal forma que podría concluirse que las células son todas iguales, o al menos muy semejantes.

De hecho, ésta es la situación de los organismos unicelulares, o de los casos más sencillos de organización multicelular, como en las esponjas; en estos casos, millones de células iguales se agrupan para formar un "organismo", que no es tal sino una asociación de células iguales. Sin embargo, a medida que los organismos se vuelven más complejos, se va produciendo la distribución del trabajo entre distintos tipos de células, y éstas a su vez deben especializarse para realizar con mayor eficiencia las funciones que les han sido encomendadas dentro del concierto de las de todo el organismo.

La especialización, al margen de que puede reconocerse tanto por las manifestaciones fisiológicas como por el aspecto macroscópico, tiene una representación bioquímica o molecular que en algunos casos se conoce con cierto detalle. A manera de ejemplo, a continuación se describen algunas de las principales propiedades que distinguen a algunas células en su funcionamiento y su estructura.

Después de los virus, que en sentido estricto no son seres vivos, sino una especie de agregados moleculares que dependen de otras células vivas para reproducirse y manifestar ciertas actividades muy limitadas (véase el capítulo 1), tenemos una gran diversidad de especies de procariontes que sí tienen vida propia y una enorme capacidad funcional. Una bacteria, por ejemplo, puede vivir aislada si cuenta con condiciones adecuadas para nutrirse y realizar con éxito su reproducción, pero también tiene mecanismos que aseguran su permanencia en el planeta. Una característica de los procariontes —además de que todas las células de una especie son semejantes— es que presentan el mínimo de elementos estructurales y funcionales capaces de sustentar vida independiente, al grado de que, por ejemplo, ni siquiera tienen un núcleo, sino una especie de agregado molecular en el que se encuentra el ADN, por lo común en un solo cromosoma.

Para transformar su energía, un procarionte dispone de su propia membrana externa, y no de mitocondrias o cloroplastos, que en las células eucariontes son las estructuras especializadas para la fosforilación oxidativa o la fotosíntesis.

Los procariontes, sin embargo, a pesar de que a simple vista no tienen una estructura complicada, tienen una gran diversidad de funciones que es difícil imaginar en un organismo de tan pequeñas dimensiones. Una bacteria o un bacilo son verdaderas obras de arte y maravillas de acomodo de miles de moléculas que interactúan en forma ordenada para producir también miles de cambios a cada instante.

Es tal la complejidad del funcionamiento de los procariontes que sorprende, por ejemplo, la capacidad que algunos microorganismos han desarrollado para atacar al ser humano. A pesar de los avances de la ciencia y la medicina, aún tenemos enfermedades infecciosas en animales, plantas y humanos, que están muy lejos de poder controlarse.

Los eucariontes, por el contrario, están conformados por células mucho más organizadas; se piensa que provinieron de la evolución de los procariontes. Su característica principal es que cuentan con una estructura celular bien definida; de hecho, su nombre da a entender en alguna forma que tienen un núcleo claro y bien estructurado. Hay una gran cantidad de especies de eucariontes unicelulares, algunos útiles para el ser humano, como las levaduras, y otros dañinos, como los microbios que producen el paludismo, la amibiasis y muchas otras enfermedades.

Los organismos unicelulares

Como ya se mencionó, hay una gran diversidad de microorganismos unicelulares independientes. Veremos algunas características interesantes de algunos de ellos.

Las levaduras son microorganismos unicelulares pertenecientes a los hongos, y hay muchas especies distintas (véase la figura IV.1). Tal vez las más conocidas sean las que se utilizan para la elaboración del vino, la cerveza y el pan, y pertenecen al género *Saccharomyces*. Tenemos noticias de la utilización de la levadura desde épocas bíblicas, cuando todavía no se sabía nada acerca de su naturaleza. Se dice que Noé descubrió por casualidad el vino. Alguna mujer por aquella misma época descuidó masa de trigo y se encontró con que se había inflado, seguramente porque se contaminó con levaduras del aire o del agua, pero se dio cuenta de que al cocerla daba lugar a un producto más esponjoso y aromático que la simple combinación de harina con agua. El proceso de elaboración de la cerveza es más complicado, pues requiere que la cebada germine para prepararla en forma de malta y luego fermentarla con levadura.

Con el paso de los años y los siglos los procedimientos se

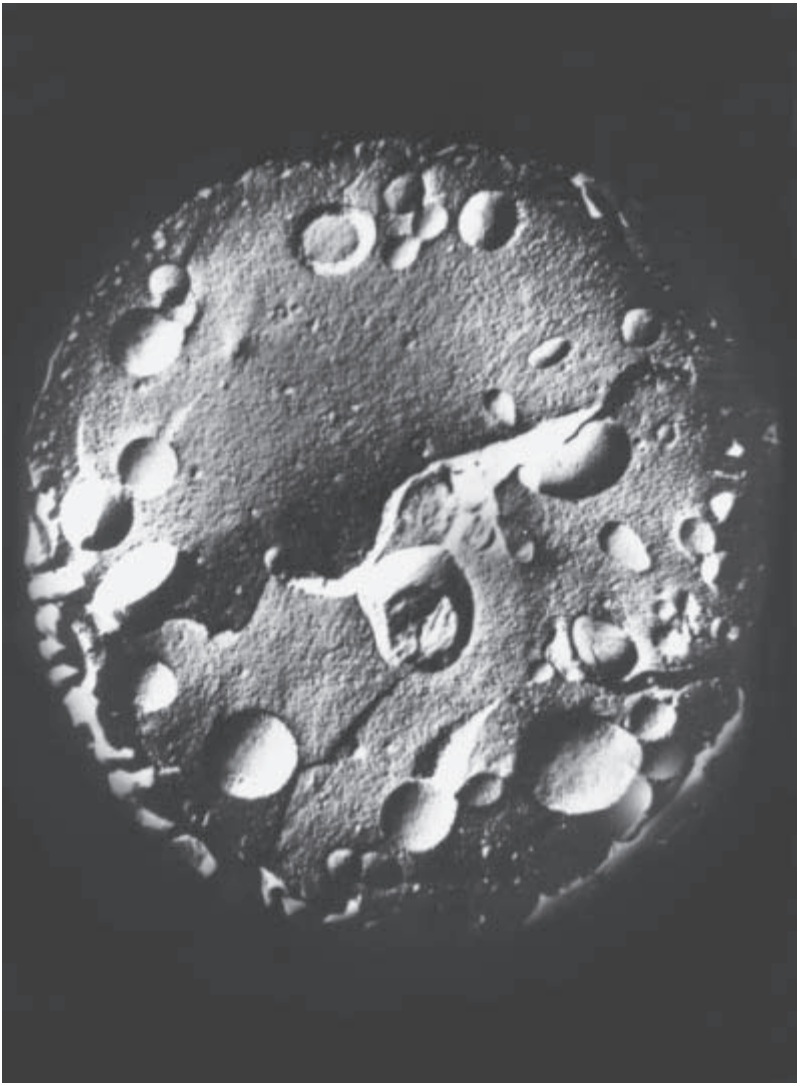


Figura iv.1. *Micrografía electrónica de una levadura.*

han perfeccionado para lograr mejores productos. La diversidad de panes que hay en el mundo es increíble. La elaboración del vino alcanza grados admirables de complejidad, y hay miles de cervezas distintas.

Ahora nos podemos preguntar cómo interviene la levadura en la elaboración de estos productos. Como ya se mencionó en el capítulo II, este organismo tiene una forma de degradar la glucosa y otros azúcares que es distinta de la que tienen los animales; por cada molécula de glucosa produce dos de alcohol y dos de bióxido de carbono:

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2CH_3—CH_2—OH + 2CO_2$$

El alcohol es el componente principal de vinos y cervezas; el sabor particular de cada bebida depende del material base que se utilice para fermentar y de la cepa de levadura; además de los vinos de uva los hay de miel, y se les puede preparar con distintos tipos de materiales azucarados. También hay una gran cantidad de otras bebidas fermentadas; simplemente en México podemos mencionar el pulque, el pozol, el tesgüino y el tepache, entre otros. Existe un procedimiento que se agrega a la fermentación y que ha permitido elaborar otras bebidas alcohólicas: se fermenta casi cualquier material que contenga azúcares o almidones —como el jugo de caña, la papa, el maíz, el trigo, la cebada, etc.—, y luego se destila el fermentado (para evaporar y condensar el alcohol), el cual se recupera como una mezcla de agua, 40% de alcohol y otros materiales volátiles que le dan distintos sabores. De este procedimiento se obtienen licores como el coñac, el ron, el tequila, etc., que en realidad son soluciones de alcohol al 40%, pero con distintos aromatizantes.

La consistencia esponjosa del pan se produce simplemente porque las levaduras fermentan los azúcares de la masa, y el bióxido de carbono (que es un gas) queda atrapado; así, al cocer la masa, las pequeñas burbujas del gas se dilatan.

Sin embargo, no fue sino hasta el siglo XIX cuando Theodor Schwann, en Alemania, descubrió que el material utilizado para producir estas fermentaciones era un organismo vivo. No fue fácil, sin embargo, convencer a nadie de esta realidad; sus afirmaciones le valieron prácticamente la enemistad de los científicos de la época, e incluso la burla de Justus von Liebig, también alemán y sabio de gran influencia. Hubo de pasar casi medio siglo para que Louis Pasteur hiciera sus célebres estudios acerca de la fermentación en la producción de la cerveza francesa. Sus resultados fueron relativamente simples: encontró que la mala calidad de la cerveza de su país —incapaz de competir con la alemana— se debía a que durante las fermentaciones se producían contaminaciones con otros microorganismos, los cuales malograban el proceso. Sus descubrimientos llevaron a una mejoría notable de la cerveza francesa, aunque sin llegar a los niveles de la alemana.

Hacia finales del siglo XIX, Eduard Buchner, también alemán, encontró que era posible romper las células de levadura y todavía lograr la fermentación. A partir de entonces se empezó a plantear que la fermentación no necesariamente era producida por el organismo vivo, sino por sustancias, que denominaron enzimas (del griego ζύμη, *zýmē,* fermento, con el prefijo ἐν, *en-*), capaces de actuar sobre la glucosa, en una serie de pasos secuenciales, para luego convertirla en alcohol. Este descubrimiento estimuló a muchos otros investigadores, que poco a poco lograron definir todas y cada una de las reacciones de la fermentación. En realidad se puede considerar que éste fue el nacimiento de la *bioquímica*.

Más adelante, los estudios llevaron a descubrir que la degradación de la glucosa se da de manera semejante en los animales. Karl Neuberg descubrió que la levadura, en condiciones especiales, puede producir glicerol, sustancia utilizada para fabricar nitroglicerina durante la primera Guerra Mundial. Había nacido también la *biotecnología,* aunque se repetía el mal

uso que con frecuencia hacemos los seres humanos de nuestros conocimientos.

Sólo por curiosidad, durante muchos decenios, sabios de todo el mundo continuaron estudiando la levadura. Gran cantidad de industrias mejoraron los procesos de producción de bebidas y de pan. En la actualidad, en el mundo se producen muchos miles de toneladas de estas células maravillosas que tan extraordinarios productos nos brindan.

Ya en épocas más recientes se ha encontrado que es posible utilizar la levadura para producir sustancias ajenas a ella introduciéndole, mediante técnicas de ingeniería genética, genes de enzimas de otras células. Es indudable que falta mucho por descubrir en relación con estos microorganismos.

Hay muchos otros microorganismos benéficos para el ser humano, como es el caso de ciertas algas microscópicas. En México, por ejemplo, existe el caso de la espirulina, que se utiliza como complemento alimenticio. Desafortunadamente sus propiedades se han exagerado y se pretende, sin razón, que una cápsula sustituya una buena alimentación. Otro caso sencillo es el de la bacteria que a partir de la glucosa produce ácido acético, ofreciéndonos, entre otras cosas, el vinagre que utilizamos en nuestras casas.

Pero así como hay organismos unicelulares benéficos, también los hay dañinos. Entre los hongos, por ejemplo, hay algunos que atacan al ser humano y a los animales. Tanto en la medicina humana como en la veterinaria existe toda un área, la micología, dedicada al estudio de las micosis, conjunto de enfermedades producidas por distintas especies de hongos entre las que se encuentran las tiñas, el pie de atleta y la actinomicosis, entre otras. Por fortuna, el desarrollo de la medicina ha permitido hacer frente a muchas de estas enfermedades.

Los protozoarios, otro tipo de organismos unicelulares, incluyen muchas especies de parásitos, es decir, organismos que no tienen la capacidad de vida libre y que por lo tanto deben

vivir a expensas de otros seres vivos. Dentro de los protozoarios dañinos mencionamos sólo tres de ellos y sus efectos en humanos y animales:

Las amibas. Éstas invaden nuestro organismo y se asientan en el intestino, donde producen ulceraciones y daño. También pueden invadir otros órganos, como el hígado, y producir extensas lesiones.

Los plasmodios. Son los microorganismos que producen el paludismo; tienen la particularidad de introducirse en nuestro organismo, alojarse dentro de nuestros glóbulos rojos y destruirlos. Ésta es una de las enfermedades más graves que padecen los humanos.

Los tripanosomas. Son los causantes de la enfermedad del sueño en África y de la enfermedad de Chagas en América.

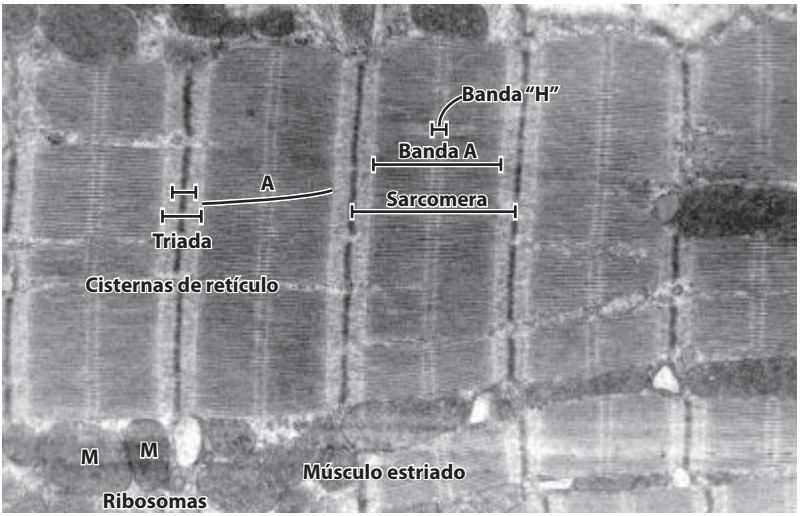
Los organismos pluricelulares

Finalmente llegamos a los organismos pluricelulares, los cuales, desde los casos más simples, resultaron de la evolución que les fue ofreciendo ventajas al agregarse células y sufrir el proceso de *diferenciación.* Este proceso consiste en que, aunque todas las células de un animal o de una planta provienen de una sola, el huevo, durante las divisiones sucesivas de éste se producen cambios que vienen programados en el ADN, y que dan lugar a modificaciones en la forma, el comportamiento y la bioquímica de los distintos tipos celulares. Estos cambios no se producen al azar y dan lugar a ventajas por la asociación de distintos tipos de células, y la reunión de verdaderas especialistas en determinadas funciones produce un organismo con capacidades considerablemente mayores, sobre todo si pensamos en el grado máximo de especialización que ha logrado el ser humano frente a los demás organismos vivos.

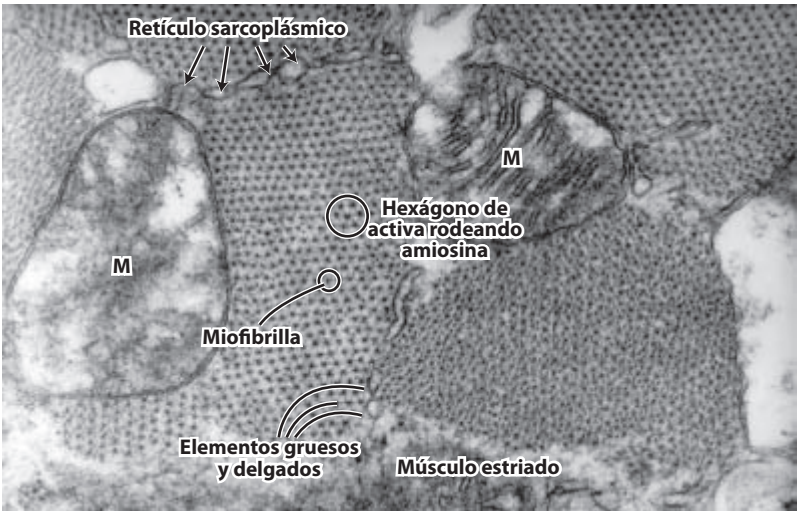
En la figura IV.2 se presenta la micrografía electrónica de un corte longitudinal y otro transversal de un músculo esquelético, que corresponde al tejido muscular voluntario que todos conocemos en los animales. Aquí resaltan dos tipos de estructuras: en primer lugar, un material fibroso de disposición regular en las miofibrillas, constituido por microfilamentos que en el corte longitudinal muestran un arreglo definido en bandas claras alternadas con bandas oscuras. En la misma figura se señala la nomenclatura de las diferentes zonas que se aprecian en el corte longitudinal. Otro detalle importante que puede observarse en la micrografía es la distribución uniforme y repetida de formaciones de una red tubular, llamada retículo sarcoplásmico, entre las miofibrillas (veáse también la figura III.5). Rodeando a éstas se encuentra el material que corresponde al citosol de otras células, y que en el músculo recibe el nombre de sarcoplasma. Además de las estructuras mencionadas, también se encuentra entre las miofibrillas un número variable de mitocondrias, dependiendo del músculo de que se trate; mientras más activo es el músculo, hay mayor cantidad de estos organelos, y más uniforme es su arreglo alrededor de las miofibrillas.

En la figura IV.3 se muestra la composición de las miofibrillas de un músculo; las bandas I se alternan con las bandas A, para las que también se ha descrito una estructura definida; pero lo importante es que ambas están formadas por microfilamentos y representan una especialización de éstos. Imbricados o empalmados unos sobre otros, los filamentos gruesos de la banda A y los delgados de la banda I se encuentran fijos por sus extremos a una especie de placa común.

Cuando se separan las proteínas de un músculo, se encuentra una proporción importante de dos componentes, la actina y la miosina, que forman un complejo entre ellas, denominado



a)



b)

Figura iv.2. *Micrografía electrónica de una fibra muscular en la que se aprecian en un corte los microfilamentos, que son en última instancia los elementos contráctiles del músculo.* a) *Corte longitudinal;* b) *corte transversal.*

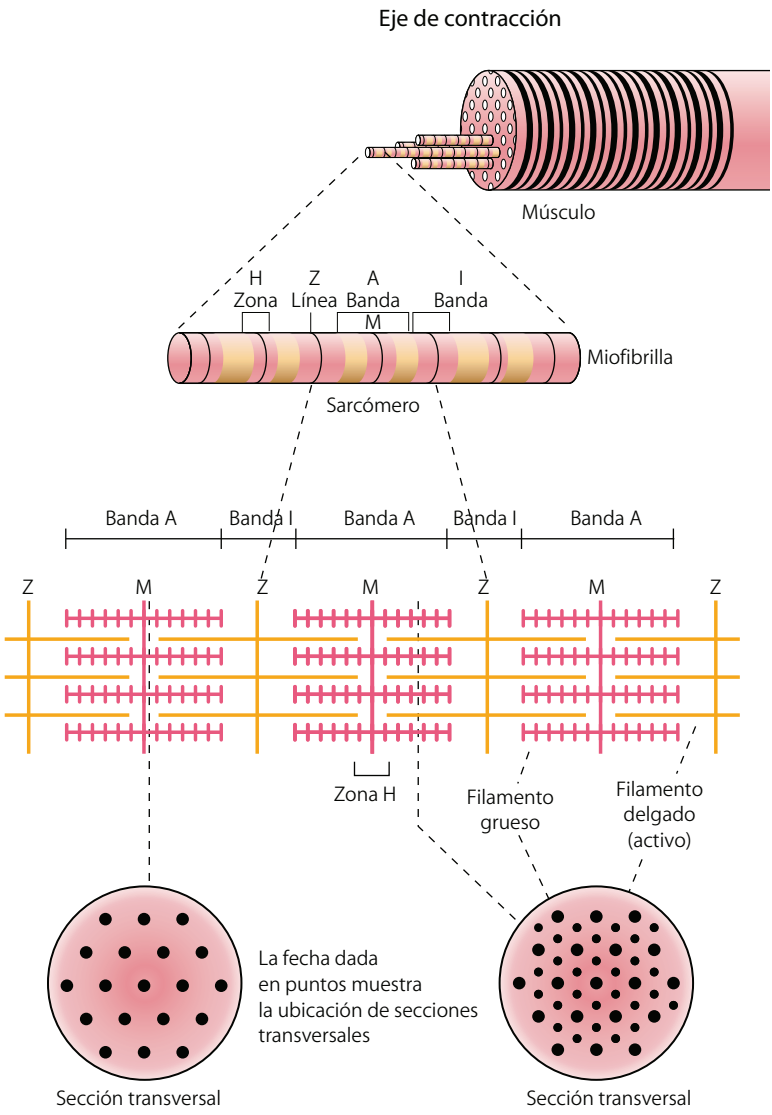


Figura iv.3. *Representación de las unidades funcionales de una fibra muscular, donde se muestra más claramente su funcionamiento.*

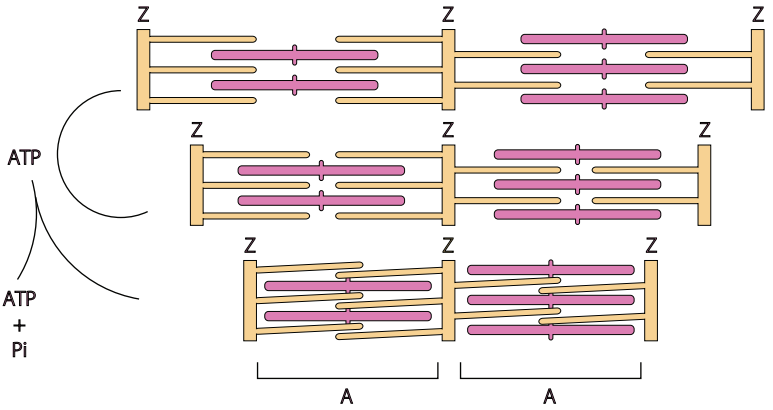


Figura iv.4. *El mecanismo de la contracción de una fibra muscular.*

actomiosina. Estas dos moléculas asociadas son capaces de romper el ATP para dar ADP y fosfato inorgánico, produciendo al mismo tiempo el acortamiento de esta estructura fibrilar. De acuerdo con estudios realizados, se ha propuesto el esquema que se representa en la figura iv.4. Según la teoría, la miosina tiene actividad de ATPasa (rompe al ATP para dar energía) y se encuentra asociada con la actina de tal modo que, cuando se rompe el ATP, la energía del enlace fosforilado se utiliza para que las dos moléculas se deslicen una sobre la otra, produciendo el acortamiento del complejo molecular.

Si se tiene en cuenta que un músculo está formado por millones de unidades de este tipo, no es difícil extrapolar lo que sucede con la asociación actina-miosina en el órgano completo, y aceptar el modelo propuesto.

Resta por describir el mecanismo propuesto para explicar no la contracción muscular, sino la producción de ella ante la llegada de una señal, o sea, una orden transmitida desde el cerebro u otras zonas del sistema nervioso por una fibra nerviosa, para que se inicie el proceso.

Como se vio en la figura iii.5, las unidades que componen el músculo presentan una distribución especial y regular del re-

tículo endoplásmico. Este sistema posee la capacidad de capturar al ion de calcio ($Ca2^{+}$) del sarcoplasma, de manera que en éste, durante el reposo, la concentración del ion es muy baja. En el momento en que un impulso nervioso llega a la célula, se produce un cambio eléctrico en la membrana, y ello da lugar a que el retículo sarcoplásmico libere al sarcoplasma parte del calcio que tiene. La hidrólisis o ruptura del ATP por la miosina requiere de calcio, de manera que la liberación de éste es la que realmente desencadena la actividad de la miosina y la contracción muscular.

El mecanismo de relajación es muy simple: el retículo sarcoplásmico, al cesar el estímulo nervioso, vuelve a su estado anterior y recaptura el calcio que había liberado. Al disminuir la concentración de éste, que se requiere para que la miosina rompa el ATP y se contraiga, se detiene también la contracción de la fibra muscular.

Mediante estos procesos, descritos en forma simplificada, los seres vivos cuentan con uno de los sistemas más eficientes que se conocen para transformar la energía química (del ATP) en energía mecánica. Pocas máquinas construidas por el ser humano reúnen la velocidad de respuesta y la necesidad de una señal tan pequeña para funcionar, ni la eficiencia para transformar una energía en otra. El músculo, con su sistema de microfilamentos, es sólo un ejemplo de este tipo de mecanismos, dentro de los cuales hay otros sistemas de movilización celular —como los de los pseudópodos y el movimiento amiboide— que existen en muchos organismos unicelulares y pluricelulares. Esta diferenciación dio lugar a uno de los fenómenos más sorprendentes de la vida: la movilidad y la independencia relativa del medio.

A diferencia de las plantas, los animales tenemos la capacidad de movernos y abandonar la dependencia o condena de permanecer en un sitio toda nuestra vida.

Sin duda el grado máximo de especialización de una célula está representado por las neuronas, que dedican la mayor parte de su actividad a transmitir y modular la transmisión de los impulsos nerviosos. La naturaleza se vale de este mecanismo en apariencia sencillo para que la conexión de unas células con otras permita integrar el funcionamiento de sistemas que pueden ser tan sencillos como un arco reflejo, constituido por dos neuronas, o tan complicados como los procesos racionales, la percepción, etcétera.

La figura IV.5 es la representación de una neurona típica; se trata de una célula que cuenta con un cuerpo, zona en que se encuentra el núcleo, y una serie de prolongaciones, unas cortas, llamadas dendritas, y otras más largas, llamadas axones. Las primeras se encargan de recibir, y las segundas de conducir y trans-

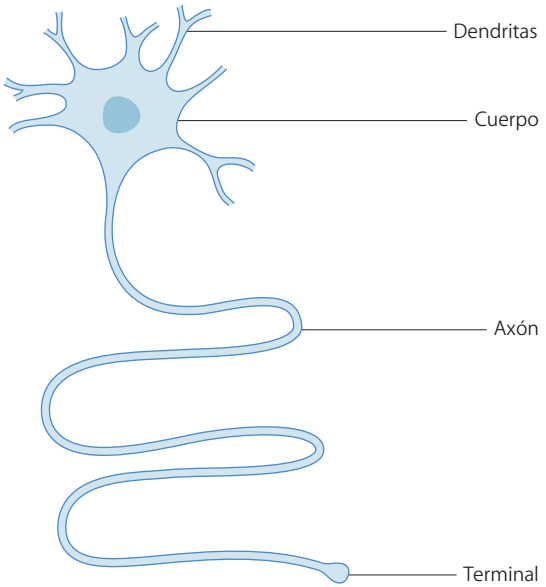


Figura IV.5. *Representación de una neurona.*

mitir los impulsos nerviosos. Las terminaciones nerviosas, axones y dendritas permiten a las células establecer conexiones entre sí; de esta forma se integran circuitos —desde muy sencillos hasta complicadísimos, por la conexión de muchísimas de ellas— mediante uniones que establecen las terminaciones mencionadas, y que reciben el nombre de sinapsis. Las sinapsis representan sitios especializados que se forman entre las terminaciones de una neurona y la superficie de otra, capaces de establecer conexiones entre ellas, permitiendo el paso del impulso nervioso, habitualmente en un solo sentido.

Las células nerviosas deben sus propiedades funcionales a sus membranas, responsables de la conducción del impulso nervioso o corriente nerviosa. Si se introduce un microelectrodo finísimo, hecho de un tubo de vidrio estirado al calor, en el axón de una célula nerviosa, y se coloca otro en el exterior, se observa una diferencia de potencial (voltaje) de aproximadamente 90 milivoltios (casi 0.1 voltios). La figura IV.6 muestra el origen de ese potencial: la membrana, que se encuentra rodeada por un medio rico en iones de sodio (Na^+) y pobre en iones de potasio (K^+), cuenta con un sistema de transporte, una ATPasa, que al romper moléculas de ATP para dar ADP y fosfato, y con la energía obtenida de la reacción, es capaz de expulsar tres iones de sodio al exterior e introducir dos iones de potasio. La distribución desigual de estos iones, y la tendencia de los de potasio a salir, es la responsable de que se establezca el potencial eléctrico antes mencionado.

Además del sistema de generación del potencial eléctrico, en la membrana también hay dos tipos de canales específicos, capaces de permitir la salida del potasio y la entrada del sodio, para producir la descarga del potencial que se había generado durante el reposo (figura IV.6). En otras palabras, la conducción del impulso nervioso es una onda que se mueve a lo largo de las terminaciones nerviosas, en la cual los iones de sodio entran y los de potasio salen de la terminación nerviosa. Una vez que el

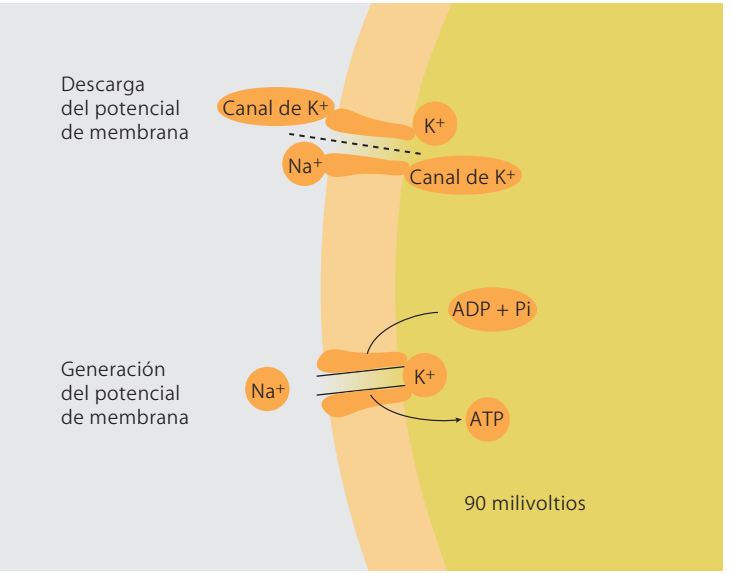


Figura iv.6. *El potencial eléctrico de una célula nerviosa, su origen y utilización para la conducción nerviosa. Ésta no es sino la propagación de una onda de disipación del potencial causada por la salida del potasio previamente acumulado y la entrada del sodio previamente expulsado por canales iónicos específicos.*

impulso pasa, la ATPasa que ya mencionamos, con su capacidad de "bombear" iones, restituye el potencial que se había perdido o disminuido.

Al llegar el impulso nervioso al extremo del axón —mediante el contacto con otra neurona a través de una sinapsis— éste se transmite por un mecanismo que puede ser eléctrico o químico. En el caso del mecanismo eléctrico, simplemente la despolarización se transmite de una neurona a otra, pasando el impulso de una célula a la otra. En muchos otros casos, el impulso nervioso se transmite gracias a que la sinapsis, al llegar éste, en lugar de transmitir la despolarización directamente, de la terminación llamada presináptica produce la liberación de sustancias químicas específicas que varían de unas neuronas a otras

en las distintas regiones del sistema nervioso, y que por su papel reciben el nombre de neurotransmisores. El neurotransmisor liberado al espacio intersináptico es como una señal que captan receptores también específicos de la postsinapsis, mismos que luego dan lugar a una respuesta que suele ser la generación o el relevo del impulso nervioso, que sigue su camino. En la figura IV.7 se muestra en forma esquemática el mecanismo de la neurotransmisión química.

Como se señala en la figura IV.7, la neurotransmisión química no siempre da lugar a que el impulso nervioso siga hacia adelante o estimule a la neurona siguiente; con frecuencia se encuentran sinapsis en las que el neurotransmisor liberado, en lugar de generar un nuevo impulso nervioso en la neurona si-

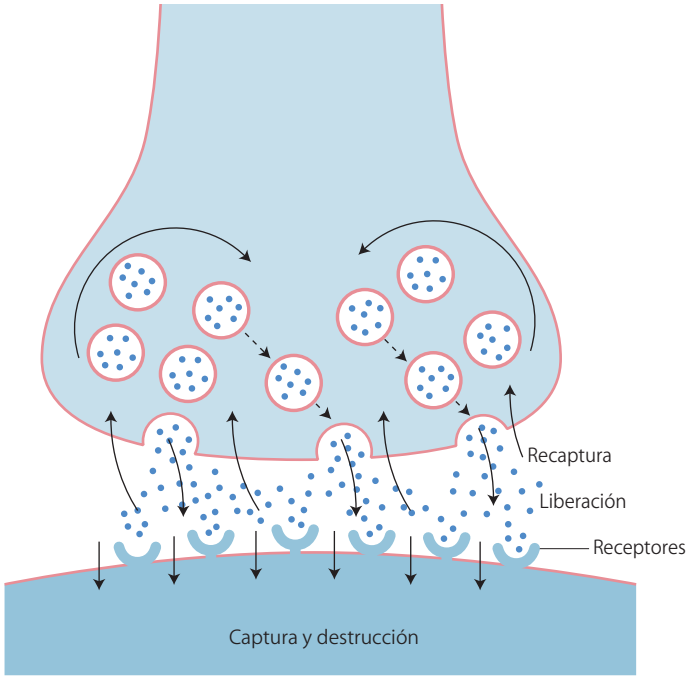


FIGURA IV.7. *La transmisión sináptica.*

guiente, produce por el contrario un cambio tal que se bloquea o disminuye el efecto de otros impulsos llegados de otra u otras neuronas. Éste es el caso de los neurotransmisores inhibidores, que actúan como moduladores de la transmisión sináptica, y su importancia reside en que son una especie de "freno" de la transmisión de los impulsos nerviosos, que se regulan por este mecanismo.

En cuanto al mecanismo de la neurotransmisión, como en el músculo, los movimientos del Ca^{2+} juegan un papel de gran importancia en el fenómeno. La liberación del neurotransmisor no se produce en un ambiente carente de este catión, y durante esta liberación se produce la captura de una cantidad de iones de calcio que guarda relación con la cantidad liberada del neurotransmisor. Los movimientos del Ca^{2+}, como en el caso del músculo, parecen tener su origen en cambios de permeabilidad de la membrana, como consecuencia de la despolarización que por la conducción llega hasta la presinapsis.

Las células sensoriales

Otro ejemplo de extraordinaria especialización celular es el de las células sensoriales, que en realidad son parte del sistema nervioso y pueden considerarse como neuronas modificadas para una función en particular que requiere el organismo. Tal vez el caso más sencillo es el de las células auditivas, que pueden recibir las vibraciones del aire a través de la vibración del tímpano, la cual se transmite por la cadena de huesecillos del oído externo al interno. Se trata simplemente de células capaces de percibir vibraciones y transformarlas en impulsos nerviosos, que luego son transmitidos a los centros auditivos del cerebro para su procesamiento e integración final para la percepción. El caso de las células del tacto es muy similar, pero se trata de neuronas modificadas que responden a cambios en la presión. En ambos

casos, cuando se aplica el estímulo correspondiente —la vibración en las células auditivas o la presión sobre los receptores táctiles— se abren canales iónicos en su superficie, que dan lugar a cambios en su potencial eléctrico y luego a su transmisión como ondas a otras neuronas para finalmente llegar al sistema nervioso central.

En el caso de las células del gusto y del olfato también hay receptores especiales en su membrana que pueden interactuar con una gran diversidad de moléculas en concentraciones variables, mayores para los receptores del gusto y sumamente bajas en el caso de los olfatorios. Estos receptores —al recibir el estímulo por la interacción con alguna molécula del medio ambiente o de un alimento, por complicados mecanismos— también dan lugar al mismo cambio del potencial de la membrana, y luego lo transmiten a otras neuronas y al sistema nervioso central.

Tal vez el caso más asombroso es el de los fotorreceptores, como los de la retina (figura IV.8). Tenemos aquí que al incidir la luz sobre una molécula derivada de la vitamina A, el retinal, la modifica, y como consecuencia de ello se desencadena una serie de eventos que llevan finalmente, al contrario de lo que sucede con otros receptores, al cierre de unos canales del fotorreceptor y a la modificación en su actividad eléctrica. Esta modificación de la actividad eléctrica se puede luego transmitir también a otras neuronas y ser enviada al sistema nervioso central.

Debe quedar claro que aquí hemos tratado estos mecanismos de una forma hasta cierto punto sencilla, y que los fenómenos de la percepción son muchísimo más complejos que lo que aquí se ha descrito, pues no sólo implican la recepción de los estímulos correspondientes a cada uno de los sentidos, sino también la transmisión al sistema nervioso central, su integración y su procesamiento, para completar el fenómeno global de la percepción.

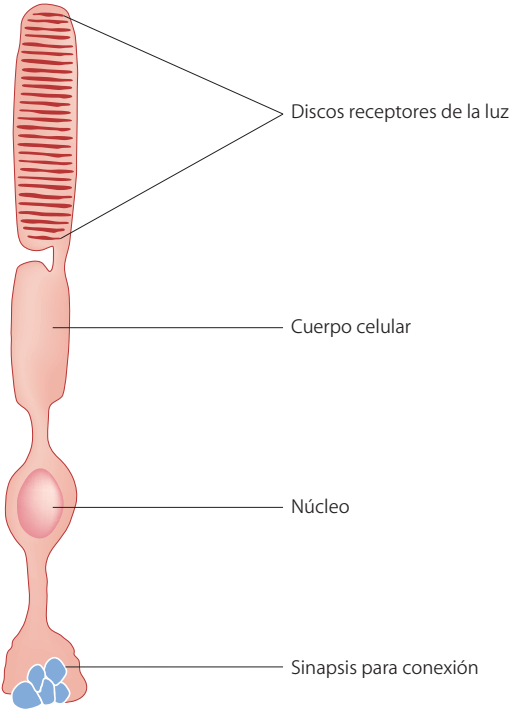


Figura iv.8. *Un fotorreceptor de la retina. La luz es capaz de actuar sobre el retinal, parte de la proteína rodopsina, y dar lugar al cierre de los canales de sodio de estas células. Este cambio del potencial de la membrana que se produce se transmite luego hacia el cerebro como un impulso nervioso.*

Una célula adiposa, ¿una célula floja?

Podríamos pensar que las células adiposas, por encontrarse llenas de grasa, son sólo almacenes de ella, y con una actividad metabólica casi nula (véase la figura iv.9). Éstas tienen una escasa cantidad de citoplasma en una pequeña capa que rodea a una gran gota de grasa, pero su actividad metabólica es intensa; su función como almacenes de grasa implica también un cons-

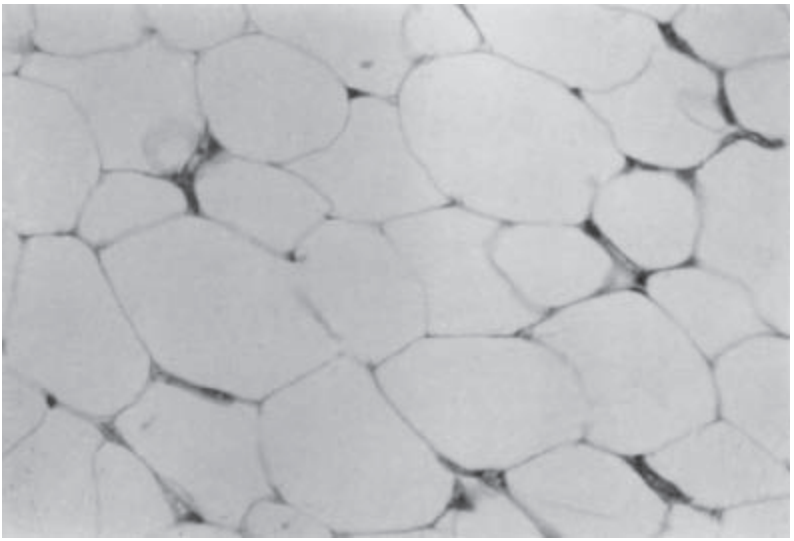


Figura iv.9. *Una célula adiposa.*

tante recambio de ésta, prácticamente entre cualquier comida, y realizan una constante degradación y síntesis de las grasas. El proceso no es simple y requiere de una cantidad elevada de energía, al grado de que el tejido adiposo necesita, como muchos otros, una vascularización profusa. Ésta es una de las razones por las cuales las personas obesas, para perder peso, no sólo deben perder grasa, sino eliminar un tejido metabólicamente activo y organizado.

Las células del hígado y el metabolismo

La célula hepática es tal vez la de mayor actividad metabólica que existe en el organismo animal; en primer lugar es el almacén de azúcares entre nuestras comidas, y es la que se encarga de proporcionar esta sustancia a los demás órganos cuando no ingerimos alimento; además, en los periodos prolongados de

ayuno, puede producirla a partir de otros materiales, sobre todo los aminoácidos. El hígado es también el principal órgano de degradación de las moléculas de grasa: las rompe en fragmentos más pequeños y las distribuye, principalmente al músculo, para su consumo. Otra de las funciones del hepatocito es la síntesis de muchas proteínas destinadas al plasma sanguíneo. El hígado es el principal encargado de destruir o neutralizar las sustancias propias del organismo, pero también de otras extrañas a él, como tóxicos, medicamentos, etc. La especialización del hígado es tal, que puede considerarse el órgano metabólico por excelencia.

Otras células

Los ejemplos que hemos mencionado no son sino una pequeña muestra del grado de especialización que alcanzan las células. Una de las funciones de las células renales es filtrar nuestra sangre, pero eso no es todo; como no sería razonable dejar que todas nuestras moléculas pequeñas se perdieran, el riñón debe recuperarlas mediante complicados mecanismos de intercambio de muy diferentes sustancias. En las plantas, las células de las raíces también tienen mecanismos muy eficientes para absorber del suelo agua y sales; basta observar la eficiencia de tales sistemas en las plantas de zonas áridas. Un fenómeno semejante ocurre con las células intestinales. También tenemos las células de nuestras glándulas, especializadas en la producción y liberación de muy diversas hormonas.

A fin de cuentas, la célula descrita en la mayor parte de este pequeño libro no es sino una idealización de algo que representa tan sólo un esquema, alrededor del cual la naturaleza ha ensayado cambios extraordinarios que le permiten realizar funciones tan diversas como las descritas. No obstante el tamaño de cada una, es casi inimaginable y hasta ahora en gran parte desconocida la cantidad, variedad y precisión de las funciones

que pueden introducirse en estructuras tan pequeñas, utilizando moléculas pequeñísimas organizadas de manera asombrosa. Para desencadenar nuestro asombro, bastaría pensar en una simple bacteria, que es capaz no sólo de mantener su vida, adaptándose a una enorme diversidad de condiciones, muchas veces adversas, sino de asegurar la permanencia de sus descendientes por millones de generaciones durante millones de años.

BIBLIOGRAFÍA

Las siguientes obras ofrecen la posibilidad de profundizar en lo tratado en este libro. Las primeras cuatro son de divulgación y las dos últimas de nivel más especializado.

Peña, A., *Fisiología 1,* Consejo Nacional para la Enseñanza de la Biología, Continental, México, 1983.

———, *Las membranas de las células,* La Ciencia para Todos, FCE/SEP/Conacyt, México, 2007.

———, *Química biológica,* Consejo Nacional para la Enseñanza de la Biología, CECSA, México, 1983.

———, y G. Dreyfus, *La energía y la vida,* La Ciencia para Todos, FCE/SEP/Conacyt, México, 2005.

Laguna, J., y E. Piña, *Bioquímica,* La Prensa Médica Mexicana, México, 1990.

Peña, A., A. Arroyo, A. Gómez-Puyou, C. Gómez y R. Tapia, *Bioquímica,* 2ª ed., Limusa, México, 1988.

La célula es la unidad básica de todo ser vivo. Su estudio, la fisiología celular, es esencial para entender la estructura y el funcionamiento de los tejidos, los órganos y los sistemas. El desarrollo de esta disciplina es el mejor ejemplo de cómo la ciencia se vincula al avance que sustenta su estudio y viceversa: gracias al perfeccionamiento del microscopio, inventado por Anton van Leeuwenhoek, y al conocimiento de la composición química de los seres vivos, actualmente es factible regenerar o sustituir tejidos dañados en humanos, elaborar vacunas e incluso desarrollar copias idénticas de algunos organismos. Gracias a los avances de la investigación científica es posible conocer miles de aspectos del funcionamiento de las células, de gran repercusión en el conocimiento, pero sobre todo en muchísimos asuntos relacionados con la salud humana. Antonio Peña nos presenta una imagen integral de las funciones de las células, desde aquellas que se pueden apreciar de manera más o menos macroscópica, como la división celular, hasta esas otras que no podemos ver, como la gigantesca serie de transformaciones químicas que hacen posible la vida.

Antonio Peña es doctor en bioquímica e investigador emérito por la UNAM. Ha sido presidente de la Academia de Investigación Científica, de la Asociación Panamericana de Bioquímica y director del Instituto de Fisiología Celular de la UNAM. Es autor también de los libros *¿Qué es el metabolismo?*, *Las membranas de las células* y *La energía y la vida. Bioenergética*, todos ellos publicados en La Ciencia para Todos.

LA CIENCIA PARA TODOS

I 22

SEP
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

www.fondodeculturaeconomica.com

9 786071 601254